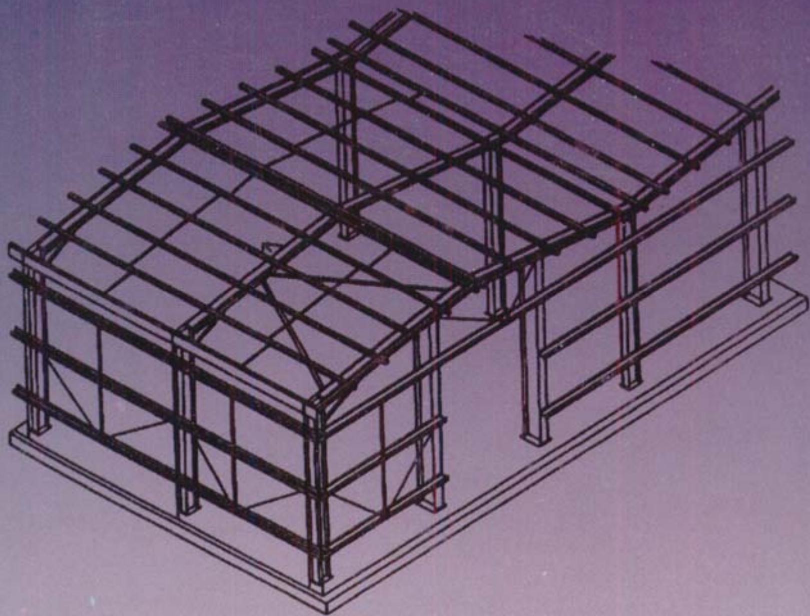
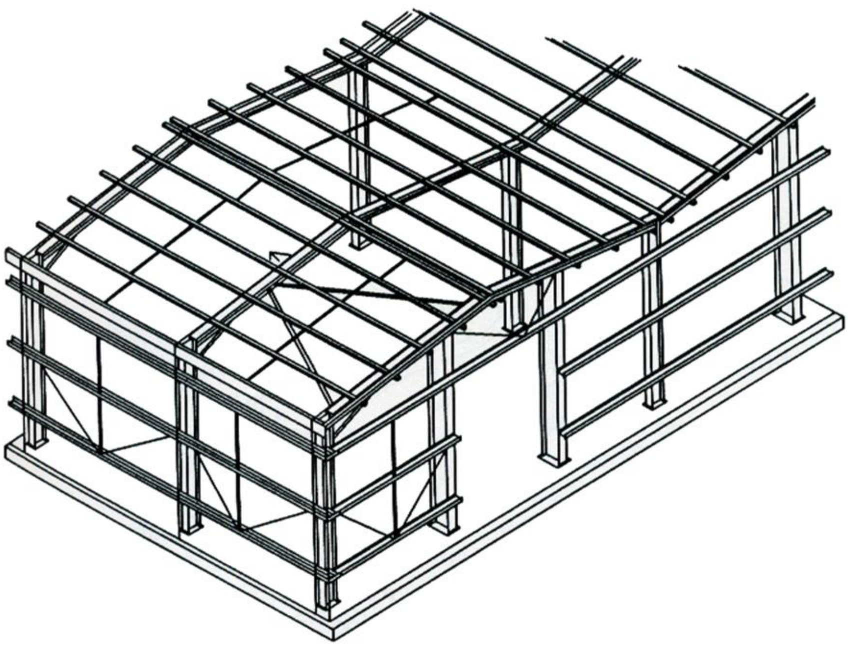
تصميم المنشآت الفولاذية



الدكتور المهندس محمد أحمد السمارة

حقوق التأليف و الطباعة و النشر محفوظة للمؤلف

تصميم المنشآت الفولاذية



الدكتور المهندس محمد أحمد السمارة

الطبعة الثانية

1424 هـ - 2003 م

حقوق التأليف والطباعة والنشر محفوظة للمؤلف

جميع حقوق التأليف والطباعة والنشر محفوظة للمؤلف
ولا يجوز طبع أي جزء من هذا الكتاب أو خزنة بواسطة أي نظام لخزن المعلومات أو نقله على أية هيئة أو بأية وسيلة سواء كانت الكترونية أو شرائط ممغنطة أو غير ذلك أو اية طريقة معلومة أو مجهولة إلا بإذن كتابي صريح من الناشر

بسم الله الرحمن الرحيم

مقدمـة

لقد مضى مائة عام تقريباً على استخدام الفولاذ لأول مرة في إشادة الأبنية والجسور. ومنذ ذلك الوقت حتى اليوم ثبتت إمكانية استخدام الفولاذ في كافة أنواع الجمل الإنشائية. وكان ذلك نتيجة لعدة عوامل منها:

* التقدم الهائل في تكنولوجيا صناعة الفولاذ حيث توفرت أصناف كثيرة من الفولاذ الإنشائي في الأسواق العالمية وكان على رأسها الفولاذ عالي المقاومة الذي أثبت جدوى اقتصادية متميزة. وكذلك الفولاذ المقاوم للظروف المناخية حيث أصبح من الممكن ترك المنشأ غير مطلي بالدهان طيلة حياته. أما المنتجات الفولاذية الرقيقة فيمكن طلاؤها بطبقة جذابة مقاومة للظروف الجوية كتلك المستعملة في طبقات التغطية.
* تطور طرائق تصنيع الجمل والعناصر الإنشائية حيث أصبح تصنيع الهياكل الإنشائية عملية إنتاجية متكاملة تُنجَز كافة مراحلها على خط إنتاج يبدأ في المواد الأولية وينتهي بالعناصر الإنشائية جاهزة للتجميع والتركيب وتميزت خطوات هذه العملية بالدقة العالية في القص والتشكيل والتثقيب واللحام ..... وذلك نتيجة استخدام آلات وأدوات يتم التحكم فيها رقمياً.
* التطور الكبير الذي حدث في معالجة السطوح ضد الصدأ حيث تم استخدام المعامل الآلية لطلاء العناصر بالمواد المختلفة وشويها.

* الفهم الأعمق للتصرف الإنشائي الذي مكّن المصممين من تقديم منشآت أكثر اقتصادية في استخدام الفولاذ دون المساس بمستوى الأمان المطلوب وبالتالي أصبح التصميم أكثر دقة.

لقد اعتمد الكتاب بشكل رئيسي على الكود البريطاني 5950 الخاص بتصميم المنشآت الفولاذية وبناءً على ذلك يمكن تقسيم الكتاب إلى المحاور الرئيسية التالية:

* مفاهيم عامة وأساسيات في التصميم: الفصل الأول والثاني
* تصميم العناصر: من الفصل الثالث وحتى الفصل التاسع.
* تصميم الوصلات : الفصل العاشر.
* تصميم الهياكل الفولاذية : من الفصل الحادي عشر وحتى الخامس عشر.
* تصميم قواعد الأعمدة: الفصل السادس عشر.
* تصميم الإطار البابي: الفصل السابع عشر.

تم وضع عدد من المسائل المحلولة في نهاية كل فصل لتساعد القارئ على استيعاب الأفكار النظرية كما تم إضافة ملحق في نهاية الكتاب يحتوي على جداول لخصائص المقاطع الفولاذية وفقاً للمواصفات البريطانية.

أخيراً أرجو الله أن أكون قد وفقت في إعداد هذا الكتاب ليكون مفيداً لزملائي المهندسين وأخوتي الطلبة وأن يضيف لبنة في صرح المكتبة العربية.

دمشق في 30 ربيع الأول 1424 هـ / 31 أيار 2003 م

المؤلف

د.م محمد أحمد السمارة

الفصـــل الأول

مفهوم التصميم وفق الحالة الحدية
Limit State Design

مبـــادئ عامـــة :

عند تصميم المنشآت يجب الأخذ بالحسبان الحالات الحدية التي تصبح عندها غير مناسبة للأهداف التي صممت من أجلها , ولتجنب الوصول إلى ذلك يجب تطبيق عوامل أمان مناسبة للحالة الحدية القصوى والحالة الحدية لمرحلة الاستثمار. ويبين الجدول (1-1) الحالات الحدية للمنشآت الفولاذية:

الجـــــدول (1-1)	
الحالات الحدية القصوى	الحالات الحدية لمرحلة الاستثمار
1- المقاومة: شاملة الوصول إلى مرحلة السيلان أو التمزق أو التحنيب أو التحول إلى ميكنزم	5- السهوم
2- الاستقرار على الانقلاب والانتقالات الجانبية	6- الاهتزاز، مثل الاهتزاز الناجم عن الرياح
3- التشقق نتيجة التعب	7- إمكانية إصلاح الأضرار الناجمة عن التعب
4- التمزق الهش	8- الصدأ والديمومة

1-1 حالات الحد الأقصى Ulimate limit states :

1-1-1 حالة حد المقاومة Limit state of strength

عند تدقيق المقاومة والاستقرار لأي منشأ، يجب ضرب الأحمال بمعاملات التصعيد γ_f المحددة في الجدول (1-2) وأخذ حالات تراكب الأحمال ألأسوأ لجزء المنشأ أو الفعل قيد الدراسة، بحيث لا يسبب الحمل المصعد بالمعامل المناسب انهيار العنصر أو وصلاته.

الجـــــدول (1-2) : معاملات التصعيد وحالات تراكب الأحمال

الأحمـــــــــــــال	عامـــل الأمـــــان γ_f
* الأحمال الميتة.	1.4
* الأحمال الميتة الممانعة لرفع المنشأ أو انقلابه	1.0
* الأحمال الميتة عند تراكبها مع الأحمال الحية وأحمال الرياح	1.2
* الأحمال الحية عند تراكبها مع الأحمال الميتة فقط	1.6
* الأحمال الحية عند تراكبها مع الأحمال الميتة وأحمال الرياح	1.2
* أحمال الرياح عند تراكبها مع الأحمال الميتة فقط	1.4
* أحمال الرياح عند تراكبها مع الأحمال الميتة والحية أو أحمال الروافع	1.2
* الأحمال الناجمة عن التأثيرات الحرارية	1.2
* أحمال الروافع:	
– الأحمال الشاقولية أو الأفقية.	1.6
– الأحمال الشاقولية والأفقية معاً.	1.4
– الأحمال الشاقولية والأفقية وأحمال الرياح معاً.	1.2

1-1-2 حالة حد الاستقرار Stability limit state :

- يجب تصعيد الأحمال بالمعامل المناسب من الجدول (2-1) عند حساب استقرار أي منشأ أو جزء منه، ويجب على المصمم الأخذ بالحسبان الاستقرار الكلي الذي يشمل الاستقرار ضد الانقلاب والاستقرار الجانبي.
- يجب أن لا تسبب الأحمال المصعدة عندما تؤخذ منفردة أو متراكبة انقلاب أو رفع المنشأ أو جزء منه عن مسانده. ويجب أن تؤخذ بالحساب حالة تراكب الأحمال الميتة والحية والرياح التي تعطي الفعل الأسوأ على الاستقرار الشامل للمنشأ. ويجب أن يؤخذ با لحسبان أي تغيير محتمل للأحمال الميتة أثناء التنفيذ أو أثناء أي ظرف مؤقت.
- يجب أن تمتلك كل المنشآت بما فيها الأجزاء بين فواصل التمدد صلابة كافية ضد عدم الاستقرار الجانبي. ولضمان ذلك يجب تحقيق المنشأ على أحمال أفقية افتراضية على الرغم من كونه قد صمم على الأحمال الأفقية التصميمية. يمكن أن تنشأ هذه القوى الافتراضية من عيوب تنفيذية مثل فقدان الشاقولية وتؤخذ الأكبر مما يلي:

* 1 % من الأحمال الميتة المصعدة عند الطابق قيد ا لدراسة, وتطبق أفقياً.
* 0.5 % من الأحمال المصعدة الميتة والحية عند الطابق قيد الدراسة, وتطبق أفقياً.

وتفترض هذه الأحمال التخيلية مطبقة في اتجاه واحد وفي كل طابق. وتحسب وتطبق عند كل طابق ومرة في كل اتجاه متراكبة مع الأحمال المصعدة الميتة والحية الشاقولية ويجب أن لا تؤخذ هذه الأحمال في الحالات التالية:

* عند تحقيق انقلاب المنشأ.
* مع تراكب الأحمال الأفقية.
* مع تراكب التأثيرات الحرارية.
* عند حساب ردود أفعال المنشأ على الأساسات.

- ويمكن تأمين الاستقرار الجانبي باستخدام الإطارات المربطة أو باستخدام إطارات ذات عقد صلبة أو الاستفادة من بيت الدرج أو نواة المصعد .....ومهما كانت الجملة التي ستستخدم لتأمين هذا الاستقرار، لا بد من الأخذ بالحسبان حالة تغير اتجاه الحمل. ويجب أن تثبت التغطية المعدنية والأسقف بشكل جيد على الهيكل الإنشائي لتتمكن من نقل الأحمال الأفقية إلى العناصر المقاومة للانزياح الجانبي.

1-2 حالة حد السهوم Deflection :

يجب أن لا تفسد السهوم الناجمة عن أحمال الاستثمار كفاءة المنشأ أو مقاومته أو مقاومة أي جزء منه وأن لا تسبب ضرراً لإنهاءات البناء. وعند تدقيق هذه السهوم يجب أن تؤخذ حالات التراكب والتوضع الأسوأ لأحمال الاستثمار. وعلى العموم أحمال الاستثمار هي الأحمال الحية المطبقة دون عوامل تصعيد. وعند الأخذ بالحسبان حالة تراكب الأحمال الحية وأحمال الرياح يؤخذ 80 % من الأحمال الحية وأحمال الرياح ولا تطبق أحمال الروافع والرياح معاً بل يؤخذ أكبرهما تأثيراً.
ويبين الجدول رقم (1-3) حدود السهوم المسموح بها لبعض العناصر الإنشائية:

الجدول (3-1) : حدود السهوم للعناصر الإنشائية (عدا إطارات الأسقف المائلة)	
آ – سهوم الجوائز الناجمة عن الأحمال الحية غير المصعدة	
* الأظفار.	الطول / 180
* الجوائز الحاملة لطينة أو إنهاءات هشة.	المجاز / 360
* كل الجوائز الأخرى.	المجاز / 200
* الجوائز الثانوية وسكك الجدران.	يحدد السهم بما يناسب مواصفات التغطية
ب – سهم الأعمدة الأفقي الناتج عن الأحمال الحية وأحمال الرياح (عدا أعمدة الإطارات)	
* أعلى أعمدة المنشآت ذات الطابق الواحد	الارتفاع / 300
* في كل طابق من بناء متعدد الطوابق	ارتفاع الطابق / 300
ج – الجوائز الحاملة للروافع	
* السهم الشاقولي الناتج عن أحمال الدواليب الساكنة.	المجاز / 600
* السهم الأفقي الناتج عن الفرملة محسوباً وفقاً لمواصفات الجناح العلوي فقط.	المجاز / 500

الفصل الثاني

خواص المواد وخصائص المقاطع

Properties of Materials and Section Properties

2-1 مواصفات الفولاذ Properties of steel :

تؤخذ المقاومة التصميمية للفولاذ p_y مساوية لإجهاد سيلان الفولاذ Y_s على أن لا تزيد على $0.84U_s$ حيث U_s هي مقاومة الشد القصوى. وتؤخذ p_y من الجدول (2-1) لأغلب أنواع الفولاذ.

الجـــــــدول (2-1) : المقاومة التصميمية		
للمقاطع المدرفلة وللصفائح وللمقاطع المفرغة $p_y N/mm^2$	السماكة أقل أو تساوي mm	ماركة الفولاذ
275 265 255 245 235	16 40 63 80 100	43 (S275)
355 345 335 325 315	16 40 63 80 100	50 (S355)
460 440 430 410 400	16 40 63 80 100	55 (S460)

كما تحدد الخصائص المرنة للفولاذ كما يلي:

معامل المرونة $E = 205\ kN/mm^2$

معامل بواسون $\nu = 0.3$

معامل التمدد الحراري $\alpha = 12x10^{-6}\ per\,C^{\circ}$

2-2 خصائص المقاطع Section properties :

2-2-1 المساحة الصافية Net area :

تؤخذ المساحة الصافية لأي مقطع أو جزء منه مساوية المساحة الكلية مطروحاً منها المساحة المفرغة لعناصر الربط. وتحسب المساحة المفرغة كمجموع مساحة مقاطع الثقوب في أي مقطع عرضي متعامد مع اتجاه الإجهادات في العنصر. وعندما تكون الثقوب متناوبة كما في الشكل (2-1) تؤخذ المساحة المفرغة الأكبر مما يلي:

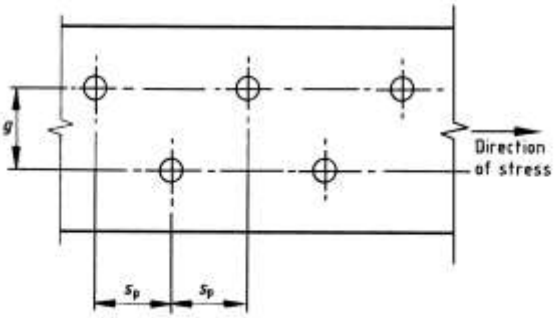
* مساحة التفريغ دون حسبان التناوب

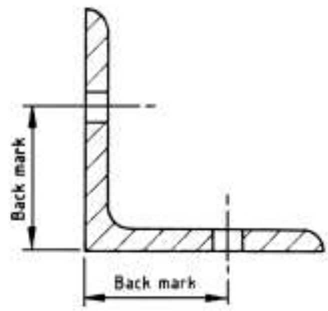
* مجموع مساحات مقاطع الثقوب الواقعة على خط متعرج (زكزاك) يقطع العنصر مطروحاً منها $s_p^2\, t/4g$ من أجل كل فراغ بين صفين من الثقوب حيث:

s_p : خطوة التناوب وهي المسافة بين مركزي ثقبين متتاليين في صفين متتاليين من الثقوب مقيسه بشكل موازي للإجهادات في العنصر. انظر الشكل (2-1)

t : سماكة العنصر عند الثقب

g : المسافة بين مركزي صفين متتاليين من الثقوب، وتقاس بشكل متعامد مع الإجهادات في العنصر ومن أجل المقاطع على شكل زاوية والتي تحتوي على صفين من الثقوب فتؤخذ المسافة g كمجموع المسافتين من مركز ي الثقبين إلى رأس الزاوية . انظر الشكل (2-2) .





الشكل (2-1) ثقوب متناوبة

الشكل (2-2)
ثقوب في كلا ساقي الزاوية

2-2-2 المساحة الفعالة عند الوصلات Effective area at connection:

تؤخذ المساحة الفعالة للعناصر عند الوصلات حيث يوجد ثقوب الروابط مساوية للمساحة الصافية مضروبة بـــ K_e على أن لا تزيد عن المساحة الكلية للعنصر. حيث:

$K_e = 1.2$ للفولاذ ذي الماركة 43

$K_e = 1.1$ للفولاذ ذي الماركة 50

$K_e = 1.0$ للفولاذ ذي الماركة 55

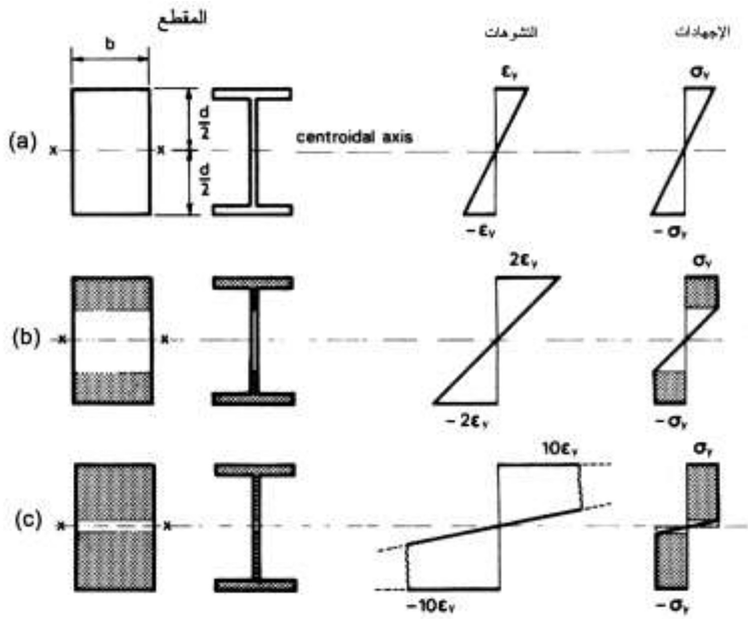
$K_e = 0.75 \frac{U_s}{Y_s} \leq 1.2$ لأنواع الفولاذ الأخرى.

2-3 تصنيف المقاطع العرضية Classification of cross sections:

يبين الشكل (2-3a) توزّع التشوهات والإجهادات الطولية في مقطع متناظر تحت تأثير عزم انعطاف في مرحلة تبلغ التشوهات في الليف الأبعد التشوهات المرنة العظمى ε_y والاجهادات حد السيلان σ_y. فإذا تم زيادة العزم المطبّق إلى أن تصل التشوهات في الليف الأبعد إلى $2\varepsilon_y$ كما في الشكل (2-3b) فإن ارتفاع المنطقة اللدونة سيزداد من الليف الأبعد باتجاه المحور المحايد مع تزايد العزم لأن الإجهادات لايمكن أن تتجاوز σ_y. وإذا استمرت زيادة العزم المطبّق إلى أن تصل

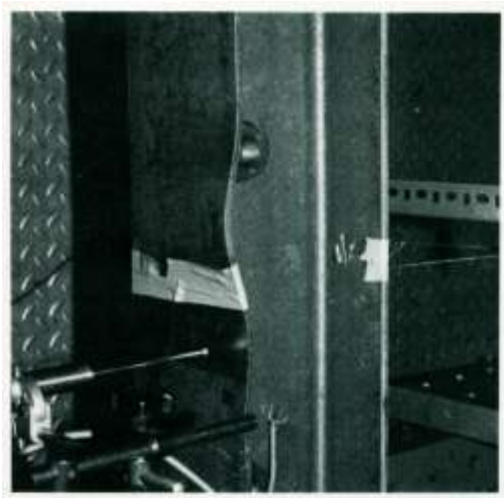
التشوهات في الليف الأبعد إلى $10\varepsilon_y$ فإن كامل المقطع تقريباً سيصبح لدناً كما في الشكل (2-3c).

عندما يصبح كامل المقطع العرضي لدناً فإن أية محاولة لزيادة العزم المطبّق ستجعل المقطع يتصرف وكأنه مفصل وسيحصل فيه دورانات كبيرة دون تغيّر ملحوظ في العزم المقاوم، تسمى هذه الظاهرة بالمفصل اللدن. ولكن على عكس المفصل الحقيقي فإن الدورانات تقاوم بعزم ثابت المقدار يسمى بالعزم اللدن.



الشكل (2-3)

يبين الشكل (2-4) مقطعاً فولاذياً حدث فيه تشوهات كبيرة بعد أن تم اختباره كعمود حيث حنب جناحه خارجاً عن شكله المستوي الأصلي دون حصول تشوهات تذكر على جسده. أي أن التحنيب كان محصوراً بعناصر صفائحية محددة من المقطع العرضي ولم يحدث تشوهاً للمقطع بكامله. أي ظهر التحنيب الموضعي في الجناح دون الجسد لأن عناصر الجناح أكثر نحافة من الجسد.



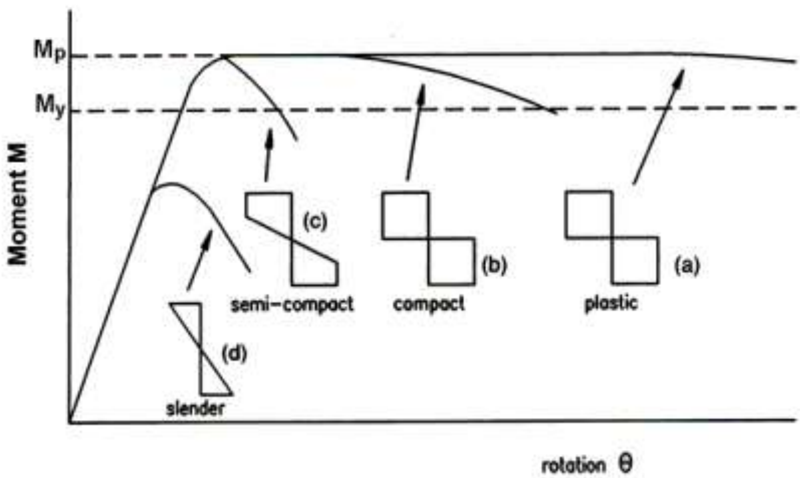
الشكل (2-4) التحنيب الموضعي لجناح عمود

يمكن تجنب التحنيب الموضعي لعنصر من المقطع العرضي نتيجة الضغط المتولد عن عزم أو قوة محورية وذلك بتحديد نسبة عرضه إلى سماكته (b/T) وعليه تصنف المقاطع وفقاً لهذه النسبة إلى مقاطع لدنة أو مدمجة أو نصف مدمجة أو نحيفة.

- المقاطع اللدنة Plastic : هي المقاطع التي تسمح بتشكل مفصل لدن فيها دون أن تتعرض لتحنيب موضعي مع حصول دوران كافٍ يؤدي إلى إعادة توزيع العزوم في المنشأ.أي أن تحمل المقطع سيصل إلى العزم اللدن M_p ويثبت عنده فتنتج دورانات كبيرة كما هو مبين في الشكل (2-5) ويبين الجدول (2-2) النسبة b/T التي يجب أن تحققها عناصر المقاطع اللدنة وفقاً للكود *BS 5950* ويجب الانتباه إلى أن هذا النوع من المقاطع يستخدم فقط في التصميم اللدن.

- المقاطع المدمجة Compact : هي المقاطع التي يصل تحملها إلى العزم اللدن M_p ولكن دون السماح بحصول دورانات كبيرة كما هو موضح في الشكل

(2-5)، أي أنها تتحمل كامل العزم اللدن ولكن حدوث تحنيب موضعي يمكن أن يمنع تطور مفصل لدن بطاقة دوران كافية تسمح باعتمادها في التصميم اللدن . ولهذا تستخدم هذه المقاطع دون قيود عدا استخدامها في التصميم اللدن. ويحدد الكود النسبة b/T التي يجب أن تحققها عناصر هذه المقاطع كما ورد في الجدول (2-2).



الشكل (2-5) تصرف الانعطاف لأنواع المقاطع المختلفة

- المقاطع نصف المدمجة Semi – Compact: تصل طاقة تحمل المقطع إلى العزم المرن M_y حيث تصل الإجهادات في الألياف القصوى إلى إجهادات السيلان. ولكن التحنيب الموضعي يمنع الوصول إلى العزم اللدن. وعليه فإن هذا النوع من المقاطع يستخدم في حالة التصميم المرن، ويبين الجدول (2-2) النسبة b/T لهذا النوع من المقاطع.

- المقاطع النحيفة Slender :هي المقاطع التي تحتوي على عناصر نحيفة خاضعة إلى ضغط ناجم عن عزم أو قوة محورية بحيث يمنع التحنيب الموضعي هذه المقاطع من الوصول إلى طاقة تحملها المرنة M_y ، وتعد المقاطع نحيفة إذا لم

تحقق شروط المقاطع نصف المدمجة الم ذكورة في الجدول (2-2). تخفض المقاومة التصميمية للعنصر النحيف p_y عندما يكون مضغوطاً وفقاً للعوامل المذكورة في الجدول (3-2) ويطبق هذا التخفيض خلال التصميم ما دام العنصر مضغوطاً ولا يطبق التخفيض عند تصميم وصلات العنصر.

وتصنف العناصر المكونة للمقطع العرضي إلى:

* عناصر داخلية متصلة من كلا طرفيها الطوليين بعناصر أخرى أو مدعمات طولية متصلة بدورها بمدعمات عرضية عند مسافات مناسبة.
* عناصر متصلة من طرف واحد فقط بعناصر أخرى والطرف الآخر حر.

وتصنف هذه العناصر أيضاً إلى لدنة أو مدمجة أو نصف مدمجة وفقاً للجدول (2-2) وتعد العناصر نحيفة إذا لم تحقق شروط العناصر نصف المدمجة.

ويبين الشكل (2-7) العناصر المكونة للمقاطع العرضية لمعظم العناصر المستخدمة في المنشآت المعدنية.

تحدد نسبة ارتفاع الجسد إلى سماكته d/t في المقاطع نصف المدمجة بما يلي:

آ – عندما تكون R موجبة.

* للمقاطع المصنعة باللحام

$$\frac{d}{t} \le \frac{120\,\varepsilon}{1+1.5\,R} \;\; and \;\; \le \left(\frac{41}{R}-13\right)\,\varepsilon$$

* للمقاطع المدرفلة

$$\frac{d}{t} \le \frac{120\,\varepsilon}{1+1.5\,R} \;\; and \;\; \le \left(\frac{41}{R}-2\right)\,\varepsilon$$

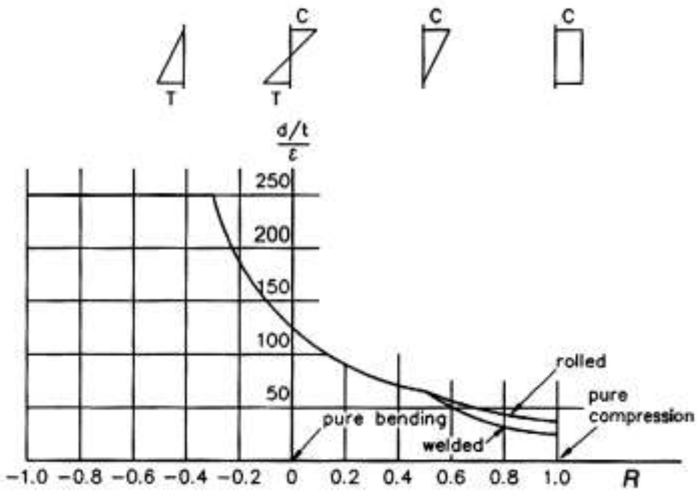
ب – عندما تكون R سالبة :

$$\frac{d}{t} \le \frac{120\,\varepsilon}{(1+R)^2} \;\; and \;\; \le 250\,\varepsilon$$

حيث : $\varepsilon = \left(275 / p_y\right)^{1/2}$

R هي نسبة متوسط الإجهادات الطولية في الجسد إلى p_y ، ويُعد الضغط موجباً والشد سالباً.

يبين الشكل (2-6) الحد الفاصل بين ارتفاع المقاطع نصف المدمجة والنحيفة بدلالة R و d/t



	d/t limits	
Range of values for R	Rolled sections	Welded sections
$R < -0.307$	250ε	250ε
$0 \geq R \geq -0.307$	$\frac{120\varepsilon}{(1+R)^2}$	$\frac{120\varepsilon}{(1+R)^2}$
$0.504 \geq R \geq 0$	–	$\frac{120\varepsilon}{1+1.5R}$
$R > 0.504$	–	$(41/R - 13)\varepsilon$
$0.656 \geq R \geq 0$	$\frac{120\varepsilon}{1+1.5R}$	–
$R > 0.656$	$(41/R - 2)\varepsilon$	–

الشكل (2-6)

Limiting width to thickness ratios			الجدول (2-2) تحديد نسبة العرض إلى السماكة	
Class Of section تصنيف المقطع			نوع المقطع Type of section	نوع العنصر Type of element
نصف مدمج (3) semi-compact	مدمج (2) compact	لدن (1) Plastic		
$\frac{b}{T} \leq 13\varepsilon$	$\frac{b}{T} \leq 8.5\varepsilon$	$\frac{b}{T} \leq 7.5\varepsilon$	مصنعة باللحام Built up by welding	عنصر جناح ناتئ مضغوط Outstand element of compression flange
$\frac{b}{T} \leq 15\varepsilon$	$\frac{b}{T} \leq 9.5\varepsilon$	$\frac{b}{T} \leq 8.5\varepsilon$	مقاطع مدرفلة Rolled sections	
$\frac{b}{T} \leq 28\varepsilon$	$\frac{b}{T} \leq 25\varepsilon$	$\frac{b}{T} \leq 23\varepsilon$	مصنعة باللحام Built up by welding	عنصر داخلي من جناح مضغوط Internal element of compression flange
$\frac{b}{T} \leq 39\varepsilon$	$\frac{b}{T} \leq 32\varepsilon$	$\frac{b}{T} \leq 26\varepsilon$	مقاطع مدرفلة Rolled sections	
$\frac{d}{t} \leq 120\varepsilon$	$\frac{d}{t} \leq 98\varepsilon$	$\frac{d}{t} \leq 79\varepsilon$	كل المقاطع All sections	جسد مقطع يمر المحور السليم من منتصف ارتفاعه Web, with neutral axis at mid-depth
انظر الفقرة(3−2)	$\frac{d}{t} \leq \frac{98\varepsilon}{\alpha}$	$\frac{d}{t} \leq \frac{79\varepsilon}{0.4+0.6\alpha}$	كل المقاطع All sections	جسد مقطع بشكل عام Web, generally
$\frac{d}{t} \leq 28\varepsilon$	$\frac{d}{t} \leq 28\varepsilon$	$\frac{d}{t} \leq 28\varepsilon$	مصنع باللحام Built up by welding	جسد مقطع كله مضغوط Web, where whole section is subject to compression
$\frac{d}{t} \leq 39\varepsilon$	$\frac{d}{t} \leq 39\varepsilon$	$\frac{d}{t} \leq 39\varepsilon$	مقاطع مدرفلة Rolled sections	

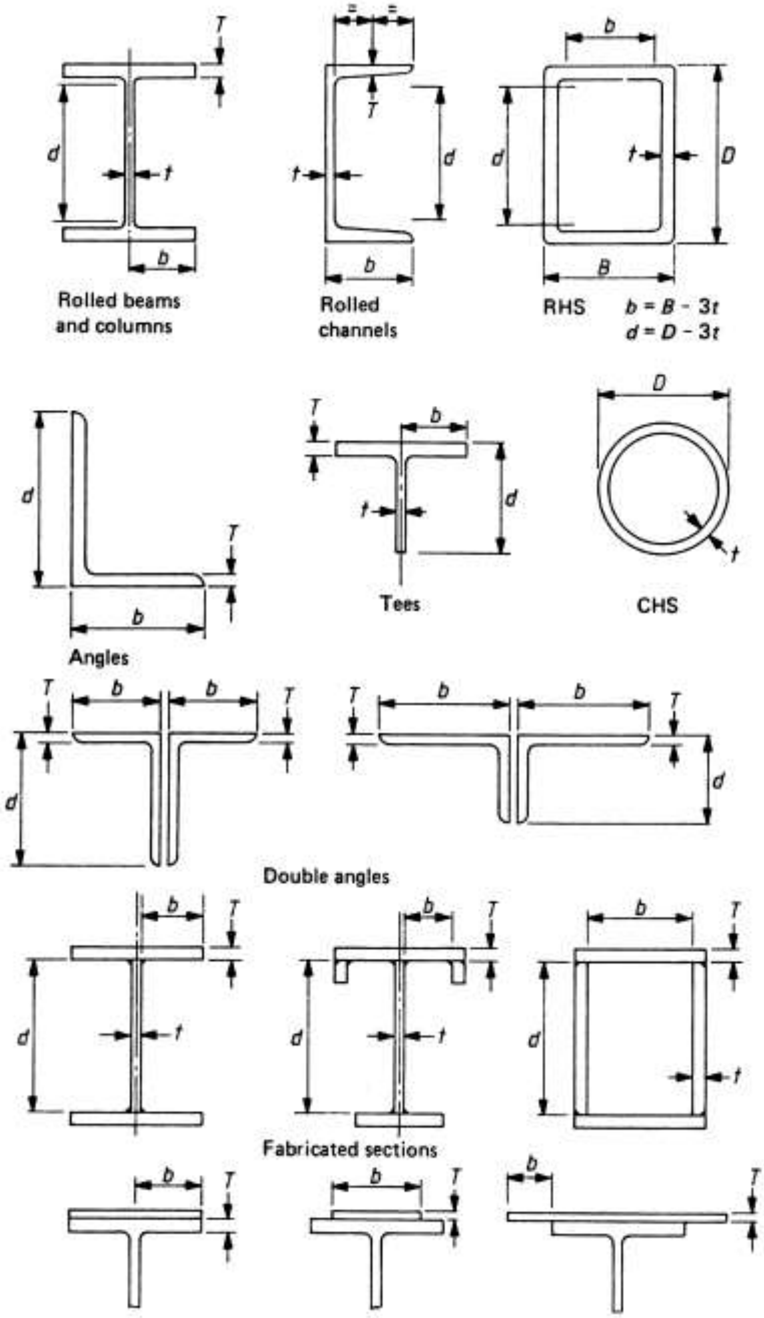
تابع الجدول (2-2) تحديد نسبة العرض إلى السماكة		Limiting width to thickness ratios		
ساق مقطع يتألف من زاوية منفردة أو زاويتين منفصلتين Legs of single angle and double angle members with components separated	مقاطع زاوية مدرفلة Rolled angle sections	$\frac{b}{T} \le 8.5\varepsilon$ and $\frac{d}{T} \le 8.5\varepsilon$	$\frac{b}{T} \le 9.5\varepsilon$ and $\frac{d}{T} \le 9.5\varepsilon$	$\frac{b}{T}$ and $\frac{d}{T} \le 15\varepsilon$ and $\frac{b+d}{T} \le 23\varepsilon$
الساقين الناتئتين للمقاطع المشكلة من زاويتين متصلتين ظهر – ظهر Outstand legs of double angle members with angles in contact back to back	مقاطع زاوية مدرفلة Rolled angle sections	$\frac{b}{T} \le 8.5\varepsilon$	$\frac{b}{T} \le 9.5\varepsilon$	$\frac{b}{T} \le 15\varepsilon$
جسد مقطع على شكل T Stems of T section	مقاطع T T Sections	$\frac{d}{t} \le 8.5\varepsilon$	$\frac{d}{t} \le 9.5\varepsilon$	$\frac{d}{t} \le 19\varepsilon$
المقاطع الدائرية المفرغة والمعرضة لعزم أو ضغط محوري Circular tube subject to moment or axial compression	مقاطع دائرية مفرغة أو مصنعة باللحام CHS or built up by welding	$\frac{D}{t} \le 40\varepsilon^2$	$\frac{D}{t} \le 57\varepsilon^2$	$\frac{D}{t} \le 80\varepsilon^2$

١. تحدد الأبعاد بـــ T, t, d, b كما في الشكل (2–5) , $\varepsilon = (275/P_y)^{1/2}$, $\alpha = 2y_c/d$

٢. حيث y_c هي المسافة بين المحور السليم اللدن وطرف الجسد المتصل مع الجناح المضغوط . لكن إذا كانت $\alpha > 2$ فيعد المقطع مضغوطاً بكامله.

٣. وعندما يكون $d/t > 63\varepsilon$ يجب تحقيق جسد المقطع على تحنيب القص.

الجدول (3 –2) معامل تخفيض المقاومة للعناصر النحيفة Strength reduction factors for slender elements		
معامل التخفيض Stress reduction factor	نوع المقطع Type of section	نوع العنصر Type of element
$\dfrac{10}{\dfrac{b}{T\varepsilon}-3}$	مقاطع مصنعة باللحام Built up by welding	عنصر ناتئ من جناح مضغوط Outstand element of compression flange
$\dfrac{11}{\dfrac{b}{T\varepsilon}-4}$	مقاطع مدرفلة Rolled sections	
$\dfrac{21}{\dfrac{b}{T\varepsilon}-7}$	مقاطع مصنعة باللحام Built up by welding	عنصر داخلي من جناح مضغوط Internal element of compression flange
$\dfrac{31}{\dfrac{b}{T\varepsilon}-8}$	مقاطع مدرفلة Rolled sections	
The lesser of $\dfrac{11}{\dfrac{d}{T\varepsilon}-4}$, $\dfrac{19}{\dfrac{(b+d)}{T\varepsilon}-4}$	مقاطع زاوية مدرفلة Rolled angle sections	ساق مقطع يتألف من زاوية منفردة أو زاويتين منفصلتين Legs of single angle and double angle members with components separated
$\dfrac{11}{\dfrac{b}{T\varepsilon}-4}$	مقاطع زاوية مدرفلة Rolled angle sections	الساقين الناتئتين للمقاطع التي تتألف من زاويتين متصلتين ظهر- ظهر Outstand legs of double angle members with angles in contact back to back
$\dfrac{14}{\dfrac{d}{t\varepsilon}-5}$	مقاطع T Sections T	جسد مقطع على شكل T Stem of T section
تحدد الأبعاد b, d, t, T كما في الشكل (2-5) ، $\varepsilon = (275/P_y)^{1/2}$		



الشكل (7–2) أبعاد المقاطع

الفصل الثالث

تصميم العناصر المشدودة

Tension Members

3 -1 مقدمـــة

تعد العناصر الإنشائية التي تنقل قوى شد محورية بين نقطتين من منشأ , أبسط وأكفأ العناصر الإنشائية. لكن هذه الكفاءة تنخفض نسبياً في كثير من الأحيان بسبب اللامركزية الناتجة عن الوصلات الطرفية التي تربط هذه العناصر إلى بقية المنشأ، وتستخدم مقاطع فولاذية مختلفة مفتوحة أو مغلقة كعناصر مشدودة مثل زوايا أو مجاري أو مقاطع على شكل T أو مقاطع مفرغة. كما يمكن استحدام مقاطع مجمعة من زاويتين أو مجرايتين فيكون للمقطع المجمع محور تناظر مما يخفض بشكل كبير اللامركزية الناتجة عن الوصلات وفي هذه الحالة يجب ربط عناصر المقطع المجمع على مسافات لتأمين العمل المشترك لهذه العناصر. وتستخدم أيضاً القضبان والمبسّطات والكابلات كعناصر مشدودة , لكن عطالتها صغيرة لذا تهتز نتيجة أحمال الرياح أو الأحمال المتحركة, لذا لا بد من تركيز الاهتمام على تخفيف هذا الاهتزاز. وتصادف العناصر المشدودة في الحبل السفلي للجوائز الشبكية أو شدادات داخلية فيها ، كما تصادف في جمل التربيط في الأبنية وفي حالات الجسور والأبنية المعلقة.

3 - 2 طاقة التحمل على الشد Tension Capacity

تحدد طاقة تحمل عنصر على الشد وفق العلاقة التالية:

$$P_t = A_e \; p_y \qquad (3\text{-}1)$$

حيث:

p_y المقاومة التصميمية (Design Strength of steel) وتتعلق بإجهاد السيلان Y_s وبمقاومة الشد القصوى للفولاذ U_s وتحدد من الجدول (2-1)

A_e المساحة الفعّالة لمقطع العنصر. وتحدد بضرب المساحة الصافية لمقطع العنصر بالمعامل K_e على أن لا تزيد على مساحة المقطع العرضي الكلية. وتحسب المساحة الصافية بطرح مساحة الثقوب المعدة للبراغي من المساحة الكلية.

K_e معامل تحدد قيمته من الجدول التالي وفقاً لنوع الفولاذ :

نوع الفولاذ	K_e
Grade 40 or 43	1.2
Grade 50 or WR 50	1.1
Grade 55	1.0

وتحدد K_e من أجل أنواع الفولاذ الأخرى بالعلاقة التالية:

$$K_e = 0.75 U_s / Y_s \leq 1.2 \qquad (3\text{-}2)$$

3 - 3 تأثير اللامركزية الناتجة عن وصلتي طرفي العنصر Eccentricity of end connections

عند تصميم العناصر المشدودة ذوات المقاطع على شكل زاوية أو مجراية أو حرف T يجب أخذ اللامركزية الناتجة عن طريقة وصل طرفيها بالحسبان وذلك بالطرائق المبسطة المذكورة في الفقرات التالية:

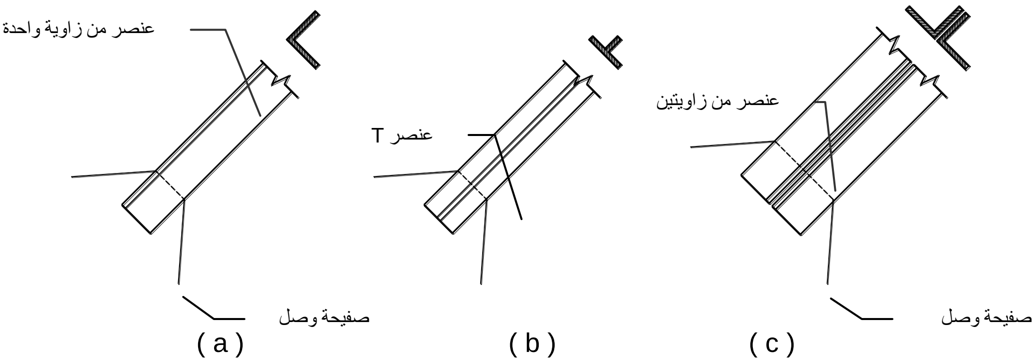
* عندما يتألف العنصر من زاوية واحدة موصولة بأحد ساقيها، أومن مجراية موصولة بجسدها، أو من مقطع على شكل حرف T موصول بجناحه كما في الشكل (3-1-a,b) فتحسب المساحة الفعّالة وفق العلاقة التالية:

$$A_e = a_1 + \left(\frac{3a_1}{3a_1 + a_2} \right) a_2 \qquad (3\text{-}3)$$

حيث:

a_1 المساحة الصافية للساق الموصولة.

a_2 المساحة الصافية للساق غير الموصولة.



الشكل (3-1) وصلات لا مركزية

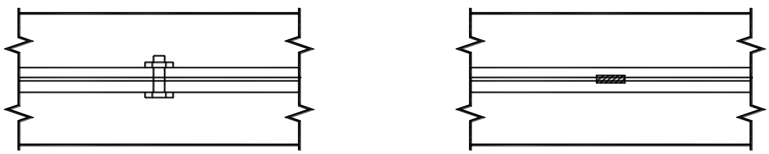
* عندما يتألف العنصر من زاويتين موصولتين ظهر إلى ظهر على جانب واحد من صفيحة الوصل كما في الشكل (3-1c) حيث تكون الزاويتان على تماس مباشر أو مفصولتين بمسافة لا تزيد على سماكة أي من الأجزاء الموصولة مع حشوات صلبة بينهما , وبحيث تكون الزاويتان موصولتين ببراغي أو لحام كما في الشكل (2-3), شرط أن لا تزيد نسبة نحافة أي من الــزاويتين على 80, فتحسب المساحة المكافئة وفق العلاقة التالية:

$$A_e = a_1 + \left(\frac{5a_1}{5a_1 + a_2} \right) a_2 \qquad (3\text{-}4)$$

حيث:

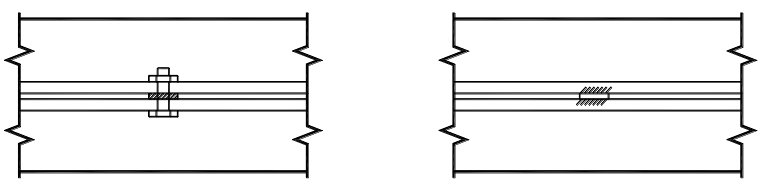
a_1 المساحة الصافية للساق الموصولة من المقطع.

a_2 المساحة الصافية للساق غير الموصولة من المقطع.



(b) ربط بواسطة اللحام (a) ربط بواسطة البراغي

للزاويتين المتلاصقتين للزاويتين المتلاصقتين



(d) ربط بواسطة اللحام (c) ربط بواسطة البراغي

للزوايتين المتباعدتين للزاواتين المتباعدتين

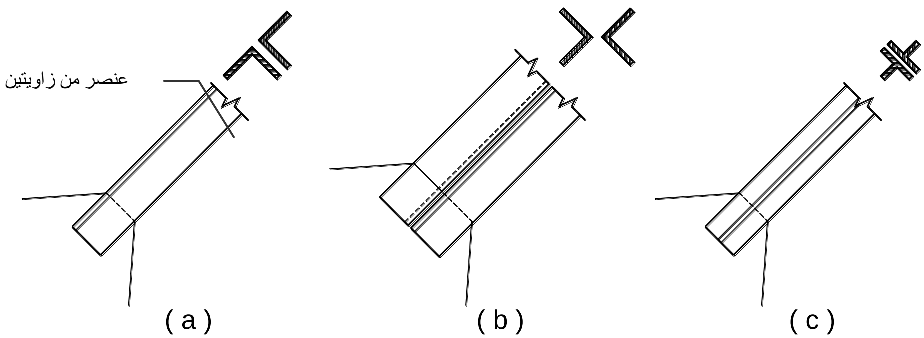
الشكل (3-2) ربط الزاويتين ببعضهما باللحام أو بالبراغي

* تحسب المساحة الفعالة مساوية إلى المساحة الصافية في الحالات التالية:

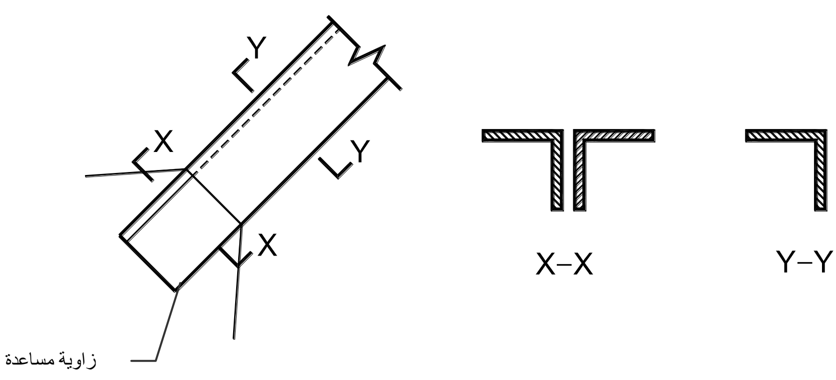
– عندما يتألف العنصر من زاويتين موصولتين على جانبي صفيحة وصل كما في الشكل (3-3) شريطة أن تكون الزاويتان متوازيتين ومربوطتين ببعضهما ببراغي أو بلحام في موقعين على الأقل , بحيث تكونا ن مفصولتين عن

بعضهما بحشوات صلبة، وبحيث تكون المسافة بين أول موقع ربط وطرف العنصر لا تتعدى تسع مرات طول أقصر ساق للزاوية. ويجب أن يكون قطر براغي الربط مساوياً لقطر براغي وصلتي الطرفين.

- عندما يتألف العنصر من زاوية واحدة موصولة ببراغي عند طرفيها بزاوية مساعدة (lug angle) كما في الشكل (3- 4)
- عندما يتألف العنصر من مقطع مجراية موصلة بكلا جناحيها أو من مقطع T موصول بجسده أو بجسده وجناحه.



الشكل (3-3) وصلات مركزية



الشكل (3-4) وصل مع زاوية مساعدة

3 - 4 العناصر الخاضعة لشد مع عزم انعطاف
Combined bending and tension

ينتج عزم الانعطاف في العناصر المشدودة إما نتيجة وصلها لا مركزياً أو نتيجة الأحمال الجانبية (غير المحورية) التي تخضع لها أو نتيجة أفعال الإطارات الصلبة.

يجب أن يتم تحقيق طاقة تحمل هذه العناصر في المواقع التي يكون فيها عزم الانعطاف والقوة المحورية أعظميين وذلك وفق العلاقة التالية:

$$\frac{F}{A_e\ p_y} + \frac{M_x}{M_{cx}} + \frac{M_y}{M_{cy}} \leq 1 \qquad (3\text{-}5)$$

حيث : F قوة الشد المحورية في العنصر، A_e المساحة الفعالة للعنصر،

p_y المقاومة التصميمية للفولاذ.

M_x , M_y عزمي الانعطاف المطبقين حول المحورين الرئيسيين لمقطع العنصر في الموقع الحرج.

M_{cx} , M_{cy} طاقة تحمل المقطع على الانعطاف حول المحورين x و y وتحسبان وفقاً للعلاقة (3-6) للمقاطع اللدنة والمدمجة وفقاً للعلاقة (3-7) للمقاطع نصف المدمجة والنحيفة على أن تخفض p_y وفقاً للجدول (2-3) في حال المقاطع النحيفة

$$M_c = p_y\ S \leq 1.2\ p_y\ Z \qquad (3\text{-}6)$$

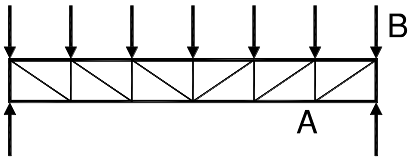
$$M_c = p_y\ Z \qquad (3\text{-}7)$$

حيث : S معامل المقطع اللدن حول المحور x من أجل M_{cx} وحول المحور y من أجل M_{cy}

Z معامل المقطع المرن حول المحور x من أجل M_{cx} وحول المحور y من أجل M_{cy}

مثال: (3-1)

صمم العنصر المشدود AB من الجائز الشبكي المبين أدناه مع العلم أن القوة الناتجة عن الأحمال الميتة $144\ kN$ وعن الأحمال الحية $240\ kN$ وأن ماركة الفولاذ المستخدم 50 وذلك باستخدام وصلات لحام أولاً ثم باستخدام وصلات براغي

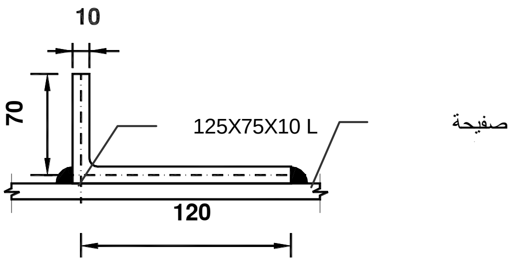


<u>الحـــــل:</u>

* الحمل المصعّد: $F = (1.4 \text{ x } 144) + (1.6 \text{ x } 240) = 585.6\ kN$

* بما أن ماركة الفولاذ 50 وبفرض سماكة العنصر أقل من $16\ mm$ فإن المقاومة التصميمية على الشد $p_y = 355\ N/mm^2$ — الجدول (2-1)

A – تصميم العنصر مع استخدام وصلات لحام:



* لنجرب زاوية منفردة $125 \text{ x } 75 \text{ x } 10$ موصولة بساقها الطويلة إلى صفيحة وصل.

* تحسب المساحة الفعّالة A_e كما يلي:

$$A_e = a_1 + \left[\frac{3\,a_1}{3\,a_1 + a_2} \right] a_2$$

$$a_1 = 120 \text{ x } 10 = 1200\ mm^2$$

$$a_2 = 70 \times 10 = 700\ mm^2$$

$$A_e = 1200 + \left[\frac{3 \times 1200}{3 \times 1200 + 700} \right] \times 700 = 1786\ mm^2$$

* تحسب قوة التحمل على الشد وفق العلاقة :

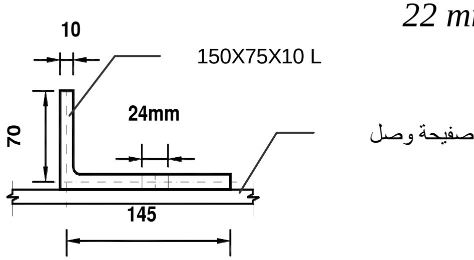
العلاقة (3-1)

$$P_t = A_e\ p_y$$

$$P_t = 1786 \times 355 \times 10^{-3} = 634\ kN > 585.6\ kN \qquad o.k.$$

B – تصميم العنصر مع استخدام وصلات براغي:

* لنجرب زاوية منفردة $150 \times 75 \times 10$ موصولة بساقها الطويلة ببراغي قطر $22\ mm$



* تحسب المساحة المكافئة A_e كما يلي:

$$A_e = a_1 + \left[\frac{3\,a_1}{3\,a_1 + a_2} \right] a_2$$

$$a_2 = 70 \times 10 = 700\ mm^2$$

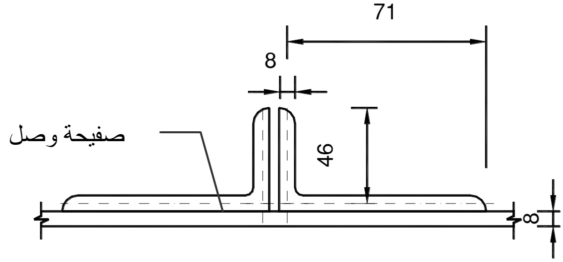
$$a_{1net} = 1450 - (24 \times 10) = 1210\ mm^2$$

$$A_e = 1210 + \left[\frac{3 \times 1210}{3 \times 1210 + 700} \right] \times 700 = 1797\ mm^2$$

العلاقة (3-1)

* تحسب قوة التحمل على الشد وفق العلاقة: $P_t = A_e\ p_y$

$$P_t = 1797 \times 355 \times 10^{-3} = 638\ kN > 585.6\ kN \qquad o.k.$$

	مثال: (3-2)
	صمم العنصر AB المذكور في المثال (3-1) بحيث يتألف من زاويتين موصولتين ظهر لظهر على جانب صفيحة الوصل بواسطة اللحام كما هو مبين في الشكل أدناه:
	
	<u>الحـــــل:</u>
	* سنختار زاويتين قياس كل منهما *8* x *50* x *75* ماركة فولاذهما 50 وموصولتين ظهر لظهر بساقيهما الطويلتين كما في الشكل أعلاه
الجدول (2-1)	* بما أن سماكة الزوايا *8 mm* فإن المقاومة التصميمية $p_y = 355\ N/mm^2$
	* تحسب المساحة الفعّالة وفق العلاقة: $A_e = 2\,x\left[\ a_1 + \left(\dfrac{5\,a_1}{5\,a_1 + a_2}\right) a_2\ \right]$ $a_1 = 71\,x\,8 = 568\,mm^2$ $a_2 = 46\,x\,8 = 368\,mm^2$ $A_e = 2\,x\left[\ 568 + \left(\dfrac{5\,x\,568}{5\,x\,568 + 368}\right) x\,368\right] = 1788\,mm^2$

تحسب قوة تحمل الشد وفق العلاقة : $P_t = A_e \text{ x } p_y = 1788 \text{ x } 355 \text{ x } 10^{-3} = 635\, kN > \; 585.6\, kN \;\; O.K.$ * يجب ربط الزاويتين ببعضهما على مسافات بحيث لا تزيد نسبة نحافة أي منهما بين نقطتي تربيط عن 80.	العلاقة (3-1)

الفصل الرابع

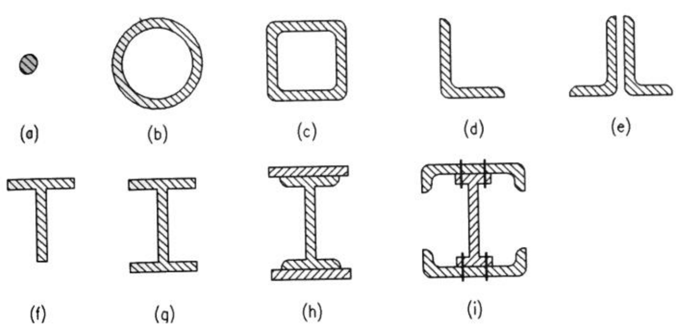
تصميم العناصر المضغوطة

Design of Columns and Struts

1 – 4 مقدمـــــة:

توجد العناصر المضغوطة كأعمدة في الإطارات أو كعناصر مضغوطة من الجوائز الشبكية أو في مواقع من الإطارات الفراغية وقلما توجد محملة قوى ضغط محوري بمفردها، ولكن يجب أن تقاوم عزوم انعطاف أيضاً. ومع ذلك يع د تحديد تحمل العنصر على الضغط المحوري مسألة بالغة الأهمية في تصميم المنشآت الفولاذية. وهذا ما سنقوم به في هذا الفصل.

يبين الشكل (4-1) أنواعاً مختلفة من المقاطع الفولاذية التي تستخدم كعناصر مضغوطة. والذي يؤثر غالباً على اختيار شكل المقطع هو درجة صعوبة تنفيذ الوصلات، فمثلاً يعد المقطع المفرغ المغلق مثالياً من الناحية النظرية ولكن المقطع المفتوح أفضل منه عملياً لأن تنفيذ وصلاته في الموقع أسهل ولا يحتاج لمعدات خاصة أو يد عاملة ذات خبرة عالية.



الشكل (4-1) مقاطع عرضية نموذجية

من أهم العوامل التي تحدد طاقة تحمل عنصر على الضغط المحوري هي نسبة نحافته λ والتي تعرف بأنها النسبة بين الطول الفعال للعنصر L_E والذي يحدد في الفقرة (3-4) ونصف قطر عطالة مقطعه r في الاتجاه المدروس. وقد فرض الكود BS 5950 حداً أعلى لنسبة النحافة يجب أن لا تتجاوزه –انظر الجدول أدناه– وذلك بغية الحصول على عناصر مضغوطة لها حد أدنى من المقاومة لحمل جانبي طارئ:

شروط التحميل	نسبة النحافة العظمى
العناصر المحملة بأحمال عدا أحمال الرياح	180
العناصر التي تقاوم الأوزان الذاتية وأحمال الرياح فقط	250
العناصر المشدودة عادة والتي ينقلب حملها إلى ضغط نتيجة أحمال الرياح	350

يجب تحقيق العنصر الذي تزيد نسبة نحافته على 180 على السهم الناتج عن وزنه الذاتي, فإذا تجاوز السهم 1/100 من طوله فيجب أخذ تأثير عزم الانعطاف بالحسبان.

تبدأ عملية تصميم أي عنصر مضغوط باختيار مقطع عرضي له بعد أن يتم تحديد حمله وشروط استناده. عندها يجب إجراء التحقيقات التالية حسب الحالة المدروسة:

* تحنيب انعطاف كلي: يتعلق بشكل رئيسي بنسبة نحافة العنصر والتي تتعلق بدورها بطوله وبمساحة وشكل مقطعه العرضي إضافة إلى شروط استناده ويتعلق أيضاً بشكل العنصر.

* تحنيب موضعي: يتعلق بالنسبة بين عرض وسماكة العناصر الصفائحية المكونة للمقطع العرضي.
* تحنيب مركبات الأجزاء: هذا يخص المقاطع المجمعة مثل الأعمدة المربطة أو المدعمة بعوارض, فيجب التأكد من مقاومة كل جزء من أجزاء المقطع.
* تحنيب انعطاف مع فتل أو تحنيب فتل: يخص المقاطع المشكلة على البارد والمقاطع المفتوحة والثقيلة ذات الشكل غير الطبيعي. حيث يكون هذا النوع من التحنيب أكثر حرجاً من تحنيب الانعطاف الكلي.
* بشكل مبدئي يجب تحقيق التحنيب الموضعي والتحنيب الكلي ولكن بشكل عملي عندما يحقق المقطع شروط المقطع نصف المدمج كحد أدنى فلا حاجة لتحقيق التحنيب الموضعي.

4 - 2 طاقة التحمل على الضغط Compressive resistance :

تتعلق طاقة تحمل عنصر مضغوط بنسبة نحافته وبمقاومة مادته وبشكل مقطعه وبطريقة تصنيعه. وتحسب وفق الكود BS 5950 بالعلاقة التالية:

$$P_c = A_g \; p_c \qquad (4\text{-}1)$$

حيث:

A_g مساحة المقطع العرضي كاملة

p_c مقاومة الضغط (Compressive strength) وتتعلق بنسبة النحافة λ والمقاومة التصميمية p_y

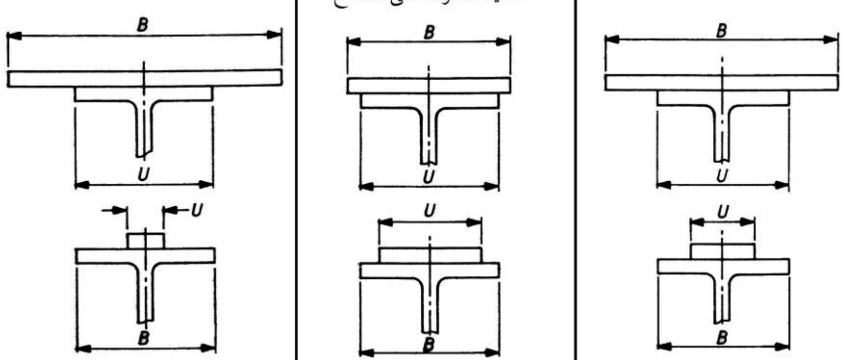
ويجب تخفيض المقاومة التصميمية كما جاء في الجدول (3-2) عندما يكون المقطع نحيفاً. ويجب تخفيضها أيضاً بـــ $20 N/mm^2$ عندما يكون المقطع مصنعاً من صفائح باللحام. يتم الحصول على قيم p_c بدلالة λ و p_y من الجداول (4-3a-d) والتي تأخذ بالحسبان أشكال المقاطع العرضية حيث بينت

التجارب أنه من أجل نسبة نحافة λ محددة فإن بعض المقاطع تكون ذات أداء أفضل من مقاطع أخرى عندما تستعمل كأعمدة وهذا مرده بشكل أساسي إلى توزيع المادة على المقطع العرضي وبشكل ثانوي إلى الإجهادات المتبقية نتيجة التبريد التفاضلي (التبريد غير المنتظم) أثناء عملية الدرفلة على الحامي. ولـــهذا قبل الدخـــول في الجـــداول (4-3 a-d) لا بد من العودة إلى الجدول (4-2) الذي يصنف أنواع المقاطع العرضية. وبناءً عليه يحدد أي من الجداول (4-3a-d) يجب استخدامه.

تطبق الطريقة السابقة على كل المقاطع التي ستستخدم كعناصر مضغوطة بما فيها المقاطع المقواة بصفائح ملحومة على جناح المقطع والمبينة في الجدول (4-1)

الجدول 1–4 نوع المقطع للاستخدام في الجدول2–4

(a) مقاطع مدرفلة H أو I	(b)مقاطع مدرفلة H أو I مع صفيحة تغطية ملحومة على الجناح	(c) مقاطع صفائحية H أو I
$0.25 < \frac{U}{B} < 0.8$	$\frac{U}{B} \geqslant 0.8$	$\frac{U}{B} \leqslant 0.25$



Strut table selection الجدول 2 - 4 اختيار الجدول المناسب للعنصر المضغوط

Type of section نوع المقطع	السماكة Thickness	محور التحنيب Axis of buckling x–x	y–y
مقاطع انشائية مفرغة مدرفلة على الحامي Hot-rolled structural hollow section		4-3a	4-3a
Rolled I-section مقاطع I مدرفلة أوكما في الجدول 4-1a		4-3a	4-3b
Rolled H-section مقاطع H مدرفلة أوكما في الجدول 4-1a	حتى 40 mm أكبر من 40 mm	4-3b 4-3c	4-3c 4-3d
مقاطع صفائحية ملحومة H أو I أو كما في الجدول 4-1c Welded plate I or H-section	حتى 40 mm أكبر من 40 mm	4-3b 4-3b	4-3c 4-3d
مقاطع مدرفلة H أو I مع صفيحة تغطية ملحومة على الجناح كما في الجدول 4-1b Rolled I or H-section with welded flange cover plates	حتى 40 mm أكبر من 40 mm	4-3b 4-3c	4-3a 4-3b
مقطع صندوقي مشكل باللحام غير مزود بمدعمات طولية Welded box section	حتى 40 mm أكبر من 40 mm	4-3b 4-3c	4-3b 4-3c
قضبان دائرية أو مربعة المقطع أو مبسطات Round, square or flat bar	حتى 40 mm أكبر من 40 mm	4-3b 4-3c	4-3b 4-3c
Rolled angle زاوية مدرفلة Rolled channel or T-section مقطع مجرابة أو T مدرفل Two rolled sections laced or battened مقطعين مدرفلين مربطين أو مدعمين بعوارض Two rolled sections back-to-back مقطعين مدرفلين موصولين ظهر لظهر Compound rolled sections مقاطع مدرفلة مجمعة		التحنيب حول أي محور 4-3c	

Compressive strength for struts, p_c, (in N/mm^2) الجدول 4-3a مقاومة الضغط للعناصر المضغوطة																
λ \ p_y	225	245	255	265	275	305	320	325	335	340	355	395	410	415	430	450
15	225	245	255	265	275	305	320	325	335	340	355	394	409	414	429	448
20	225	244	254	264	273	303	317	322	332	337	351	390	405	410	424	444
25	222	241	251	261	270	299	314	318	328	333	347	386	400	405	419	438
30	220	239	248	258	267	296	310	315	324	329	343	381	395	399	414	432
35	217	236	245	254	264	292	306	310	320	324	338	375	389	393	407	425
40	214	233	242	251	260	287	301	305	315	319	333	368	382	386	399	417
42	213	231	240	249	258	285	299	303	312	317	330	365	378	383	396	413
44	212	230	239	248	257	283	297	301	310	314	327	362	375	379	392	409
46	210	228	237	246	255	281	294	299	307	312	325	359	371	375	388	404
48	209	227	236	244	253	279	292	296	305	309	322	355	367	371	383	399
50	208	225	234	242	251	277	289	293	302	306	318	351	363	367	379	394
52	206	223	232	241	249	274	286	291	299	303	315	346	358	362	373	388
54	205	222	230	238	247	271	283	287	295	299	311	342	353	356	367	381
56	203	220	228	236	244	268	280	284	292	296	307	336	347	350	361	374
58	201	218	226	234	242	265	277	281	288	292	303	331	341	344	354	366
60	200	216	224	232	239	262	273	277	284	288	298	325	335	337	347	358
62	198	214	221	229	236	259	269	273	280	283	293	318	328	330	339	349
64	196	211	219	226	234	255	265	268	275	278	288	311	320	322	331	340
66	194	209	216	223	230	251	261	264	270	273	282	304	312	314	322	330
68	192	206	213	220	227	247	256	259	265	268	276	296	304	306	313	320
70	189	204	210	217	224	242	251	254	259	262	270	288	295	297	303	310
72	187	201	207	214	220	237	246	248	253	256	264	280	287	288	294	299
74	184	198	204	210	216	233	240	243	247	250	256	272	278	279	284	289
76	182	194	200	206	212	227	235	237	241	243	249	264	269	270	275	279
78	179	191	197	202	208	222	229	231	235	237	242	255	260	261	265	269
80	176	188	193	198	203	217	223	225	229	230	235	247	251	252	256	259
82	173	184	189	194	199	211	217	219	222	224	228	239	243	243	247	250
84	170	181	185	190	194	206	211	213	216	217	221	231	234	235	238	240
86	167	177	181	186	190	200	205	207	209	211	214	223	226	226	229	231
88	164	173	177	181	185	195	199	200	203	204	208	215	218	218	221	223
90	161	169	173	177	180	189	193	195	197	198	201	208	211	211	213	215
92	158	166	169	173	176	184	188	189	191	192	194	201	203	203	206	207
94	154	162	165	168	171	179	182	183	185	186	188	194	196	196	198	200
96	151	158	161	164	166	173	176	177	179	180	182	187	190	189	191	192
98	147	154	157	159	162	168	171	172	173	174	176	181	183	183	185	186

(concluded) **4-3a تابع الجدول**

p_y / λ	225	245	255	265	275	305	320	325	335	340	355	395	410	415	430	450
100	144	150	153	155	157	163	166	167	168	169	171	175	176	177	178	179
102	141	146	149	151	153	158	161	161	163	163	165	169	170	171	172	173
104	137	142	145	147	149	154	156	156	158	158	160	163	165	165	166	167
106	134	139	141	143	145	149	151	152	153	153	155	158	159	159	160	161
108	131	135	137	139	141	145	146	147	148	149	150	153	154	154	155	156
110	127	132	133	135	137	140	142	143	144	144	145	148	149	149	150	151
112	124	128	130	131	133	136	138	138	139	140	141	143	144	144	145	146
114	121	125	126	128	129	132	134	134	135	135	136	139	140	140	141	141
116	118	121	123	124	125	129	130	130	131	131	132	135	135	135	136	137
118	115	118	120	121	122	125	126	126	127	127	128	130	131	131	132	133
120	112	115	116	118	119	121	122	123	123	124	125	127	127	127	128	129
122	109	112	113	114	115	118	119	119	120	120	121	123	123	123	124	125
124	107	109	110	111	112	115	116	116	116	117	117	119	120	120	120	121
126	104	106	107	108	109	111	112	113	113	113	114	116	116	116	117	117
128	101	104	105	105	106	108	109	109	110	110	111	112	113	113	113	114
130	99	101	102	103	103	105	106	106	107	107	108	109	110	110	110	111
135	93	95	96	96	97	98	99	99	100	100	101	102	102	102	103	103
140	87	89	90	90	91	92	93	93	93	94	94	95	95	96	96	96
145	82	84	84	85	85	86	87	87	87	88	88	89	89	89	90	90
150	78	79	79	80	80	81	82	82	82	82	83	83	84	84	84	89
155	73	74	75	75	75	76	77	77	77	77	78	78	79	79	79	79
160	69	70	70	71	71	72	72	72	73	73	73	74	74	74	74	74
165	65	66	67	67	67	68	68	68	69	69	69	70	70	70	70	70
170	62	63	63	63	64	64	65	65	65	65	65	66	66	66	66	66
175	59	59	60	60	60	61	61	61	61	61	62	62	62	62	62	63
180	56	56	57	57	57	58	58	58	58	58	58	59	59	59	59	59
185	53	54	54	54	54	55	55	55	55	55	55	56	56	56	56	56
190	51	51	51	51	52	52	52	52	52	53	53	53	53	53	53	53
195	48	49	49	49	49	49	50	50	50	50	50	50	51	51	51	51
200	46	46	47	47	47	47	47	47	48	48	48	48	48	48	48	48
210	42	42	42	42	43	43	43	43	43	43	43	44	44	44	44	44
220	38	39	39	39	39	39	39	39	40	40	40	40	40	40	40	40
230	35	35	36	36	36	36	36	36	36	36	36	37	37	37	37	37
240	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	34	34	34	34	34	34
250	30	30	30	30	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
260	28	28	28	28	28	28	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
270	26	26	26	26	26	26	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
280	24	24	24	24	24	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
290	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
300	21	21	21	21	21	21	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
310	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	21
320	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
330	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
340	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
350	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16

الجدول 4-3b مقاومة الضغط للعناصر المضغوطة

Compressive strength for struts, p_c, (in N/mm^2)

λ \ p_Y	225	245	255	265	275	305	320	325	335	340	355	395	410	415	430	450
15	225	245	255	265	275	305	320	325	335	340	355	394	409	413	428	447
20	224	243	253	263	272	301	315	320	330	334	349	387	401	406	420	439
25	220	239	248	258	267	295	309	314	323	328	342	379	393	397	411	430
30	216	234	243	253	262	289	303	307	316	321	335	371	384	389	402	420
35	211	229	238	247	256	283	296	300	309	313	327	361	374	379	392	409
40	207	224	233	241	250	276	288	293	301	305	318	351	364	368	380	396
42	205	222	231	239	248	273	285	289	298	302	314	347	359	363	375	391
44	203	220	228	237	245	270	282	286	294	298	310	342	354	358	369	385
46	201	218	226	234	242	267	279	283	291	294	306	337	349	352	364	379
48	199	215	223	231	239	263	275	279	287	291	302	332	343	347	358	372
50	197	213	221	229	237	260	271	275	283	286	298	327	337	341	351	365
52	195	210	218	226	234	256	267	271	278	282	293	321	331	334	349	358
54	192	208	215	223	230	253	263	267	274	278	288	315	325	328	337	350
56	190	205	213	220	227	249	259	263	269	273	283	309	318	321	330	342
58	188	202	210	217	224	245	255	258	265	268	278	302	311	314	322	333
60	185	200	207	214	221	241	250	254	260	263	272	295	304	306	314	325
62	183	197	204	210	217	236	246	249	255	258	266	288	296	299	306	316
64	180	194	200	207	213	232	241	244	249	252	261	281	289	291	298	307
66	178	191	197	203	210	227	236	239	244	247	255	274	281	283	289	298
68	175	188	194	200	206	223	231	233	239	241	249	267	273	275	281	288
70	172	185	190	196	202	218	226	228	233	235	242	259	265	267	272	279
72	169	181	187	193	198	213	220	223	227	230	236	252	257	259	264	270
74	167	178	183	189	194	208	215	217	222	224	230	244	249	251	255	261
76	164	175	180	185	190	204	210	212	216	218	223	237	241	243	247	252
78	161	171	176	181	186	199	205	206	210	212	217	230	234	235	239	244
80	158	168	172	177	181	194	199	201	204	206	211	222	226	227	231	235
82	155	164	169	173	177	189	194	196	199	200	205	215	219	220	223	227
84	152	161	165	169	173	184	189	190	193	195	199	209	212	213	216	219
86	149	157	161	165	169	179	183	185	188	189	193	202	205	206	208	212
88	146	154	158	161	165	174	178	180	182	183	187	195	198	199	201	204
90	143	150	154	157	161	169	173	175	177	178	181	189	192	192	195	197
92	139	147	150	153	156	165	168	170	172	173	176	183	185	186	188	191
94	136	143	147	150	152	160	164	165	167	168	171	177	179	180	182	184
96	133	140	143	146	148	156	159	160	162	163	165	171	173	174	176	178
98	130	137	139	142	145	151	154	155	157	158	160	166	168	168	170	172
100	127	133	136	138	141	147	150	151	152	153	155	161	162	163	164	166
102	124	130	132	135	137	143	146	146	148	149	151	156	157	158	159	161
104	122	127	129	131	133	139	141	142	144	144	146	151	152	153	154	156
106	119	124	126	128	130	135	137	138	139	140	142	146	148	148	149	151
108	116	121	123	125	126	131	133	134	135	136	138	142	143	143	144	146

تابع الجدول 4-3b

λ \ p_Y	225	245	255	265	275	305	320	325	335	340	355	395	410	415	430	450
110	113	118	120	121	123	128	130	130	131	132	134	137	139	139	140	141
112	111	115	117	118	120	124	126	127	128	128	130	133	134	135	136	137
114	108	112	114	115	117	121	123	123	124	125	126	129	130	131	132	133
116	105	109	111	112	114	117	119	120	121	121	122	125	126	127	128	129
118	103	106	108	109	111	114	116	116	117	118	119	122	123	123	124	125
120	100	104	105	107	108	111	113	113	114	114	116	118	119	119	120	121
122	98	101	103	104	105	108	110	110	111	111	112	115	116	116	117	118
124	96	99	100	101	102	105	107	107	108	108	109	112	112	113	113	114
126	94	96	97	99	100	103	104	104	105	105	106	109	109	110	110	111
128	91	94	95	96	97	100	101	101	102	102	103	106	106	106	107	108
130	89	92	93	94	95	97	98	99	99	100	101	103	103	104	104	105
135	84	86	87	88	89	91	92	93	93	93	94	96	96	97	97	98
140	79	81	82	83	84	86	87	87	87	88	88	90	90	91	91	92
145	75	77	78	78	79	81	81	82	82	82	83	84	85	85	85	86
150	71	72	73	74	74	76	77	77	77	77	78	79	80	80	80	81
155	67	69	69	70	70	72	72	72	73	73	73	75	75	75	75	76
160	64	65	66	66	66	68	68	68	69	69	69	70	71	71	71	71
165	60	61	62	63	63	64	65	65	65	65	66	66	67	67	67	67
170	57	58	59	59	60	61	61	61	61	62	62	63	63	63	63	64
175	55	56	56	56	57	58	58	58	58	58	59	59	60	60	60	60
180	52	53	53	54	54	55	55	55	55	55	56	56	57	57	57	57
185	49	50	51	51	51	52	52	52	53	53	53	54	54	54	54	54
190	47	48	48	48	49	49	50	50	50	50	51	50	51	51	51	52
195	45	46	46	46	47	47	47	48	48	48	48	48	49	49	49	49
200	43	44	44	44	44	45	45	45	46	46	46	46	46	46	47	47
210	39	40	40	40	41	41	41	41	42	42	42	42	42	42	42	43
220	36	37	37	37	37	38	38	38	38	38	38	39	39	39	39	39
230	33	34	34	34	34	35	35	35	35	35	35	35	35	35	36	36
240	31	31	31	31	32	32	32	32	32	32	32	33	33	33	33	33
250	29	29	29	29	29	29	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
260	27	27	27	27	27	27	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
270	25	25	25	25	25	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
280	23	23	23	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
290	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	23	23	23	23	23	23
300	20	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
310	19	19	19	19	19	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
320	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	19	19	19	19	19	19
330	17	17	17	17	17	17	17	17	18	18	18	18	18	18	18	18
340	16	16	16	16	16	16	16	16	17	17	17	17	17	17	17	17
350	15	15	15	15	15	15	15	15	16	16	16	16	16	16	16	16

الجدول 4-3c مقاومة الضغط للعناصر المضغوطة

Compressive strength for struts, p_c, (in N/mm^2)

λ \ p_Y	225	245	255	265	275	305	320	325	335	340	355	395	410	415	430	450
15	225	245	255	265	275	305	320	325	335	340	355	393	408	413	427	446
20	224	242	252	261	271	299	312	317	326	331	345	382	396	401	414	433
25	217	235	245	254	263	290	303	308	317	321	335	370	384	388	402	419
30	211	228	237	246	255	281	294	298	307	311	324	358	371	375	388	405
35	204	221	230	238	247	272	284	288	296	300	313	345	357	361	374	389
40	198	214	222	230	238	262	274	278	285	289	301	332	343	347	358	373
42	195	211	219	227	235	258	269	273	281	285	296	326	337	340	351	366
44	193	208	216	224	231	254	265	269	276	280	291	320	330	334	344	358
46	190	205	213	220	228	250	261	264	271	275	286	314	324	327	337	351
48	187	202	209	217	224	246	256	260	267	270	280	307	317	321	330	343
50	184	199	206	213	220	241	252	255	262	265	275	301	310	314	323	335
52	181	196	203	210	217	237	247	250	257	260	270	294	303	306	315	327
54	179	193	199	206	213	232	242	245	252	255	264	288	296	299	308	319
56	176	189	196	202	209	228	237	240	246	249	258	281	289	292	300	310
58	173	186	192	199	205	223	232	235	241	244	252	274	282	284	292	302
60	170	183	189	195	201	219	227	230	236	238	247	267	274	277	284	293
62	167	179	185	191	197	214	222	225	230	233	241	260	267	269	276	285
64	164	176	182	188	193	210	217	220	225	227	235	253	260	262	268	276
66	161	173	178	184	189	205	212	215	220	222	229	246	252	254	260	268
68	158	169	175	180	185	200	207	210	214	216	223	239	245	247	252	259
70	155	166	171	176	181	195	202	204	209	211	217	232	238	239	244	251
72	152	163	168	172	177	191	197	199	203	205	211	226	231	232	237	243
74	149	159	164	169	173	186	192	194	198	200	205	219	223	225	229	235
76	146	156	160	165	169	181	187	189	193	194	200	212	217	218	222	227
78	143	152	157	161	165	177	182	184	187	189	194	206	210	211	215	220
80	140	149	153	157	161	172	177	179	182	184	188	200	203	205	208	213
82	137	146	150	154	157	168	173	174	177	179	183	193	197	198	201	205
84	134	142	146	150	154	163	168	169	172	174	178	187	191	192	195	199
86	132	139	143	146	150	159	163	165	168	169	173	182	185	186	189	192
88	129	136	139	143	146	155	159	160	163	164	168	176	179	180	183	186
90	126	133	136	139	142	151	155	156	158	159	163	171	173	174	177	180
92	123	130	133	136	139	147	150	152	154	155	158	165	168	169	171	174
94	120	127	130	133	135	143	146	147	149	150	153	160	163	163	166	168
96	118	124	127	129	132	139	142	143	145	146	149	155	158	158	160	163
98	115	121	123	126	129	135	138	139	141	142	145	151	153	154	155	158
100	112	118	120	123	125	132	134	135	137	138	140	146	148	149	151	153
102	110	115	118	120	122	128	131	132	133	134	136	142	144	144	146	148
104	107	112	115	117	119	125	127	128	130	130	133	138	130	140	142	143
106	105	110	112	114	116	121	124	125	126	127	129	134	135	136	137	139
108	102	107	109	111	113	118	120	121	123	123	125	130	131	132	133	135

تابع الجدول 4-3c

p_y / λ	225	245	255	265	275	305	320	325	335	340	355	395	410	415	430	450
110	100	104	106	108	110	115	117	118	119	120	122	126	127	128	129	131
112	98	102	104	106	107	112	114	115	116	117	118	122	124	124	125	127
114	96	99	101	103	105	109	111	112	113	113	115	119	120	121	122	123
116	93	97	99	101	102	106	108	109	110	110	112	116	117	117	118	120
118	91	95	96	98	100	104	105	106	107	107	109	112	114	114	115	116
120	89	93	94	96	97	101	103	103	104	105	106	109	110	111	112	113
122	87	91	92	93	95	98	100	100	101	102	103	106	107	108	109	110
124	85	88	90	91	92	96	97	98	99	99	100	103	104	105	106	107
126	83	86	88	89	90	94	95	95	96	97	98	101	102	102	103	104
128	82	84	86	87	88	91	93	93	94	94	95	98	99	99	100	101
130	80	82	84	85	86	89	90	91	91	92	93	95	96	97	97	98
135	75	78	79	80	81	84	85	85	86	86	87	89	90	90	91	92
140	71	74	75	76	76	79	80	80	81	81	82	84	85	85	85	86
145	68	70	70	71	72	74	75	76	76	76	77	79	80	80	80	81
150	64	66	67	68	68	70	71	71	72	72	73	74	75	75	76	76
155	61	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69	70	71	71	71	72
160	58	59	60	61	61	63	64	64	64	64	65	66	67	67	67	68
165	55	56	57	58	58	60	60	60	61	61	61	63	63	63	64	64
170	52	54	54	55	55	57	57	57	58	58	58	59	60	60	60	61
175	50	51	52	52	53	54	54	54	55	55	55	56	57	57	57	58
180	48	49	49	50	50	51	52	52	52	52	53	54	54	54	54	55
185	46	46	47	47	48	49	49	49	50	50	50	51	51	51	52	52
190	43	44	45	45	46	46	47	47	47	47	48	48	49	49	49	49
195	42	42	43	43	43	44	45	45	45	45	46	46	46	47	47	47
200	40	41	41	41	42	42	43	43	43	43	43	44	44	44	45	45
210	36	37	38	38	38	39	39	39	39	39	40	40	41	41	41	41
220	34	34	35	35	35	36	36	36	36	36	36	37	37	37	37	38
230	31	32	32	32	32	33	33	33	33	33	34	34	34	34	34	35
240	29	29	29	30	30	30	31	31	31	31	31	31	32	32	32	32
250	27	27	27	28	28	28	28	28	29	29	29	29	29	29	29	29
260	25	25	26	26	26	26	26	26	27	27	27	27	27	27	27	27
270	23	24	24	24	24	24	24	25	25	25	25	25	25	25	25	25
280	22	22	22	22	23	23	23	23	23	23	23	23	24	24	24	24
290	21	21	21	21	21	21	21	21	22	22	22	22	22	22	22	22
300	19	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	21	21	21	21	21
310	18	18	18	18	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	20
320	17	17	17	17	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
330	16	16	16	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
340	15	15	15	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
350	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

الجدول 4-3d مقاومة الضغط للعناصر المضغوطة

Compressive strength for struts, p_c, (in N/mm^2)

λ \ p_Y	225	245	255	265	275	305	320	325	335	340	355	395	410	415	430	450
15	225	245	255	265	275	305	320	325	335	340	355	393	407	411	425	444
20	223	241	250	259	269	296	309	314	323	327	341	376	390	394	408	426
25	214	231	240	249	257	283	296	301	309	313	326	360	373	377	390	407
30	205	222	230	238	247	271	283	287	296	300	312	344	356	360	372	388
35	196	212	220	228	236	259	271	274	282	286	297	327	339	342	353	368
40	188	203	210	218	225	247	258	261	268	272	283	310	321	324	334	348
42	184	199	206	214	221	242	252	256	263	266	277	304	314	317	327	340
44	181	195	202	209	216	237	247	251	257	261	271	297	306	309	319	331
46	178	192	199	205	212	232	242	245	252	255	265	290	299	302	311	323
48	174	188	195	201	208	227	237	240	246	249	259	283	291	294	303	314
50	171	184	191	197	204	222	232	235	241	244	253	276	284	287	295	306
52	168	181	187	193	199	217	226	229	235	238	246	269	277	279	287	298
54	165	177	183	189	195	213	221	224	229	232	240	262	269	272	279	289
56	161	173	179	185	191	208	216	219	224	227	234	255	262	264	271	281
58	158	170	175	181	187	203	211	213	218	221	229	248	255	257	264	272
60	155	166	172	177	183	198	206	208	213	215	223	241	247	250	256	264
62	152	163	168	173	178	193	201	203	208	210	217	234	240	242	248	256
64	149	159	164	169	174	189	196	198	202	204	211	227	233	235	241	248
66	145	156	160	165	170	184	191	193	197	199	205	221	226	228	234	240
68	142	152	157	162	166	179	186	188	192	194	200	214	220	221	226	233
70	139	149	153	158	162	175	181	183	187	189	194	208	213	215	219	225
72	136	145	150	154	158	170	176	178	182	183	189	202	207	208	213	218
74	133	142	146	150	155	166	171	173	177	178	183	196	200	202	206	211
76	130	139	143	147	151	162	167	169	172	173	178	190	194	195	199	204
78	127	136	139	143	147	157	162	164	167	169	173	184	188	189	193	198
80	125	132	136	140	143	153	158	160	163	164	168	179	182	184	187	191
82	122	129	133	136	140	149	154	155	158	159	163	173	177	178	181	185
84	119	126	130	133	136	145	150	151	154	155	159	168	171	172	176	179
86	117	123	127	130	133	142	146	147	149	151	154	163	166	167	170	174
88	114	120	123	127	130	138	142	143	145	146	150	158	161	162	165	168
90	111	118	121	123	126	134	138	139	141	142	146	154	156	157	160	163
92	109	115	118	120	123	131	134	135	137	138	142	149	152	152	155	158
94	106	112	115	117	120	127	131	132	134	135	138	145	147	148	150	153
96	104	109	112	115	117	124	127	128	130	131	134	140	143	143	146	148
98	101	107	109	112	114	121	124	125	126	127	130	136	138	139	141	144
100	99	104	107	109	111	117	120	121	123	124	126	132	134	135	137	139
102	97	102	104	106	108	114	117	118	120	121	123	129	131	131	133	135
104	95	99	102	104	106	111	114	115	116	117	120	125	127	127	129	131
106	93	97	99	101	103	109	111	112	113	114	116	121	123	124	125	127
108	90	95	97	99	101	106	108	109	110	111	113	118	120	120	122	124

تابع الجدول 4-3d

p_Y / λ	225	245	255	265	275	305	320	325	335	340	355	395	410	415	430	450
110	88	93	95	96	98	103	105	106	108	108	110	115	116	117	118	120
112	86	90	92	94	96	101	103	103	105	105	107	112	113	114	115	117
114	84	88	90	92	94	98	100	101	102	103	104	109	110	110	112	113
116	83	86	88	90	91	96	98	98	99	100	102	106	107	107	109	110
118	81	84	86	88	89	93	95	96	97	97	99	103	104	105	106	107
120	79	83	84	86	87	91	93	94	94	95	96	100	102	102	103	104
122	77	81	82	84	85	89	91	91	92	93	94	97	99	99	100	102
124	76	79	81	82	83	87	88	89	90	90	92	95	96	96	97	99
126	74	77	79	80	81	84	86	87	88	88	89	93	94	94	95	96
128	72	75	77	78	79	83	84	85	85	86	87	90	92	92	93	94
130	71	74	75	76	77	81	82	83	83	84	85	88	89	89	90	91
135	67	70	71	72	73	76	77	78	79	79	80	83	84	84	85	86
140	64	66	67	68	69	72	73	74	74	74	75	78	79	79	80	81
145	60	63	64	65	66	68	69	70	70	70	71	73	74	74	75	76
150	58	59	61	61	62	64	65	66	66	66	67	69	70	70	71	71
155	55	57	58	58	59	61	62	62	63	63	64	65	66	66	67	67
160	52	54	55	55	56	58	59	59	59	60	60	62	63	63	63	64
165	50	51	52	53	53	55	56	56	56	57	57	59	59	59	60	60
170	47	49	50	50	51	52	53	53	54	54	54	56	56	56	57	57
175	45	47	47	48	48	50	50	51	51	51	52	53	54	54	54	54
180	43	45	45	46	46	47	48	48	48	49	49	50	51	51	51	52
185	42	42	43	43	44	45	46	46	46	46	47	48	48	48	49	49
190	40	41	41	42	42	43	44	44	44	44	45	46	46	46	47	47
195	38	39	40	40	40	41	42	42	42	42	43	44	44	44	44	45
200	36	37	38	38	39	40	40	40	40	41	41	42	42	42	42	43
210	34	34	35	35	35	36	37	37	37	37	37	38	39	39	39	39
220	31	32	32	32	33	33	34	34	34	34	34	35	35	35	36	36
230	29	29	30	30	30	31	31	31	31	32	32	32	33	33	33	33
240	27	27	28	28	28	29	29	29	29	29	29	30	30	30	30	30
250	25	25	26	26	26	27	27	27	27	27	27	28	28	28	28	28
260	23	24	24	24	24	25	25	25	25	25	25	26	26	26	26	26
270	22	22	23	23	23	23	23	24	24	24	24	24	24	24	24	24
280	20	21	21	21	21	22	22	22	22	22	22	23	23	23	23	23
290	19	20	20	20	20	20	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
300	18	18	19	19	19	19	19	19	19	19	20	20	20	20	20	20
310	17	17	18	18	18	18	18	18	18	18	18	19	19	19	19	19
320	16	16	17	17	17	17	17	17	17	17	17	18	18	18	18	18
330	15	15	16	16	16	16	16	16	16	16	16	17	17	17	17	17
340	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	16	16	16	16	16
350	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	15	15	15	15	15	15

4 - 3 الأطوال الفعالة Effective lengths

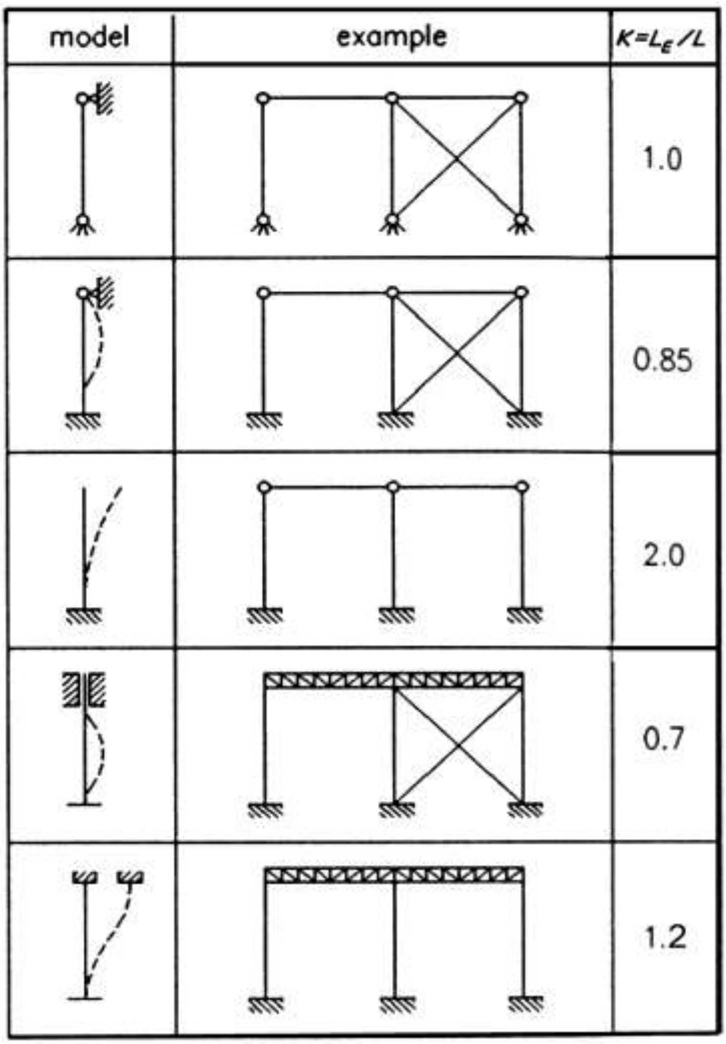
تُبنى المعلومات الأساسية التي تربط طاقة تحمل العمود بنحافته على فكرة العمود المتمفصل من طرفيه حيث لا يمكن لطرف أن ينتقل بالنسبة للطرف الآخر مع حرية الدوران في كلا الطرفين. لكن يوجد للعناصر المضغوطة في المنشآت الحقيقية العديد من شروط الاستناد الأقل تقييداً بالنسبة للانتقالات مع أو بدون حرية في الدوران. يعالج هذا الموضوع عادةً في التصميم باستخدام فكرة طول العمود المكافئ الذي يمكن أن يُعرَّف على أنه طول عمود مكافئ متمفصل من طرفيه وله طاقة تحمل العمود المدروس ذاتها. لذلك عند تحديد نسبة نحافة عمود نستبدل الطول الحقيقي L بالطول الفعال L_E .

ويبين الجدول (4-4) الأطوال الفعالة لبعض الحالات النموذجية من شروط الاستناد وفق الكود BS 5950:

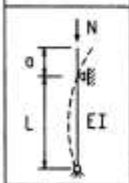
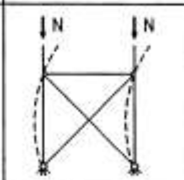
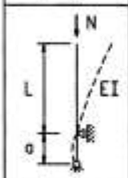
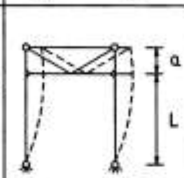
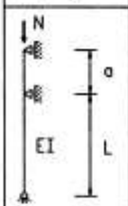
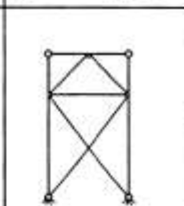
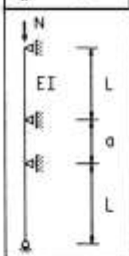
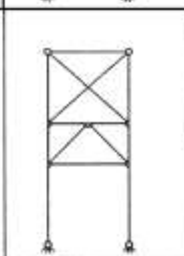
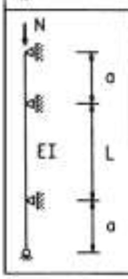
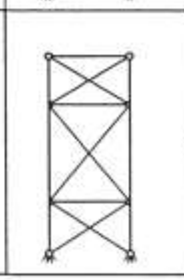
الجدول (4-4) : الطول الفعال L_E للعناصر المضغوطة

شروط الاستناد في الطرفين		الطول الفعال L_E
مثبت في مكانه في كلا الطرفين	ممنوع من الدوران في كلا الطرفين	*0.7 L*
	ممنوع من الدوران جزئياً في كلا الطرفين	*0.85 L*
	ممنوع من الدوران في طرف واحد	*0.85 L*
	مسموح بالدوران في كلا الطرفين	*1.0 L*
أحد الطرفين ممنوع من الانتقال ومن الدوران	الطرف الآخر مسموح له بالإنتقال وممنوع من الدوران	*1.2 L*
	الطرف الآخر مسموح له با لإنتقال وممنوع من الدوران جزئياً	*1.5 L*
	الطرف الآخر مسموح له بالإنتقال ومسموح له بالدوران	*2.0 L*

ويبين الشكلين (4-2 a,b) النسبة $k = L_E / L$ لبعض الحالات النموذجية من الأعمدة مشتقة وفق نظرية الاستقرار المرن :



الشكل (4-2a) معامل الطول الفعال $k = L_E / L$ لبعض الحالات النموذجية

column	frame	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	a/L
		1.0	1.11	1.24	1.40	1.56	1.74	1.93	2.16	2.31	2.50	2.70	L_E/L
		2.0	2.07	2.13	2.20	2.27	2.34	2.41	2.48	2.55	2.62	2.70	L_E/L
		0.70	0.72	0.74	0.77	0.79	0.81	0.84	0.87	0.91	0.95	1.0	L_E/L
		0.70	0.73	0.76	0.79	0.82	0.85	0.88	0.91	0.94	0.97	1.0	L_E/L
		0.50	0.53	0.57	0.61	0.65	0.70	0.75	0.81	0.87	0.93	1.0	L_E/L

الشكل (4-2b) معامل الطول الفعال $k = L_E / L$ لبعض الحالات النموذجية

1 - 3 – 4 الأطوال الفعالة لعناصر الإطارات ذات العقد الصلبة

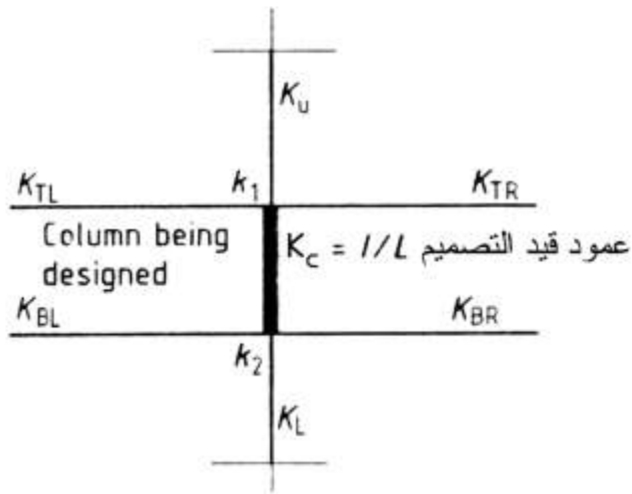
من المفيد جداً عند تحديد الطول الفعال لعناصر الإطارات ذات العقد الصلبة استخدام فكرة الانزياح الجانبي ، حيث يع د العنصر ممنوعاً من الانزياح الجانبي عندما لا ينتقل أحد طرفيه بالنسبة للطرف الآخر، ويع د مسموحاً له الانزياح الجانبي عندما يكون مسموحاً لأحد طرفيه الانتقال بالنسبة للطرف الآخر. ففي الحالة الأولى لن يزيد الطول الفعال عن الطول الهندسي للعنصر، أما في الحالة الثانية فيكون الحد الأدنى للطول الفعال مساوياً للطول الهندسي ويقترب من اللانهاية عندما يكون العمود متمفصلاً عند القاعدة ومسموحاً له بالدوران في أعلاه. إذاً يتعلق الطول الفعال للعناصر المضغوطة في الإطارات ذات العقد الصلبة بدرجة التقييد التي تؤمنها العناصر المتصلة بالعمود. أي أن هناك تأثيراً متبادلاً بين كل عناصر الإطار لأن المسألة هي مسألة تحنيب الإطار ككل وليس عنصراً محدداً. ولكن من أجل التصميم تبسط المسألة ويؤخذ إطار محدود كالمبين في الشكل (3-4). ويتم الحصول على نسبة الطول الفعال L_E / L من المخططين المبينين في الشكلين (4-4 a,b) باستخدام معاملي درجة التقيد k_1 و k_2 الذين يحددان وفق ما يلي:

$$k = \frac{\text{مجموع صلابات الأعمدة في العقدة}}{\text{مجموع صلابات كل العناصر في العقدة}}$$

$$k_1 = \frac{K_c + K_u}{K_c + K_u + K_{TL} + K_{TR}} \quad , \quad k_2 = \frac{K_c + K_L}{K_c + K_L + K_{BL} + K_{BR}}$$

K_L و K_U تساوي I / L لكل من العمودين الأسفل والأعلى مباشرة من العمود المدروس

K_{BR} و K_{BL} و K_{TR} و K_{TL} تساوي نسبة من I / L للجوائز المتصلة مباشرة بالعمود المدروس



الشكل (3-4) معاملي التقييد للإطار المحدود

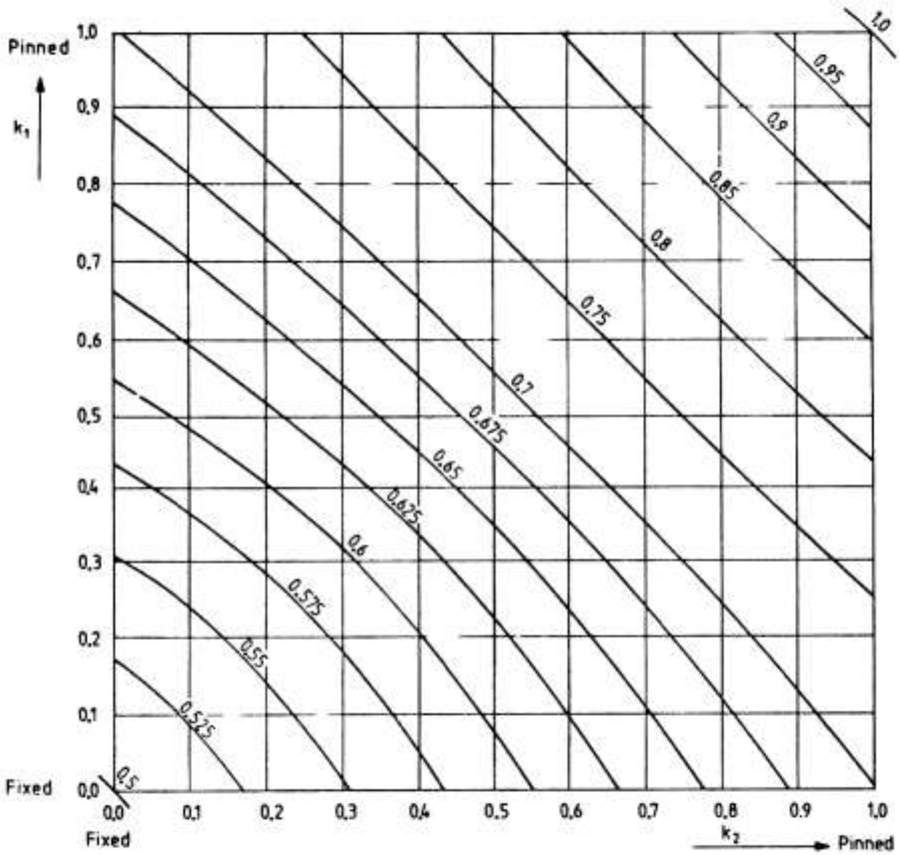
تؤخذ صلابة العنصر غير المتصل بشكل صلب إلى العمود مساوية صفر. وتؤخذ صلابة الجائز K_B الساند مباشرة لبلاطة خرسانية مساوية I/L حيث I عزم عطالة الجائز. أما في الحالات التي لا تسند فيها الجوائز بلاطات خرسانية فتؤخذ صلابتها النسبية كمايلي :

$K_B = 0.5\,I/L$ في الإطارات الممنوعة من الانزياح الجانبي.

$K_B = 1.5\,I/L$ في الإطارات غير الممنوعة من الانزياح الجانبي.

عند تحليل الإطارات يجب أن تؤخذ الصلابات التي تؤمنها القواعد في الاتجاه المدروس. وفي حال عدم توفر معلومات تفصيلية تؤخذ صلابة القاعدة كما يلي:

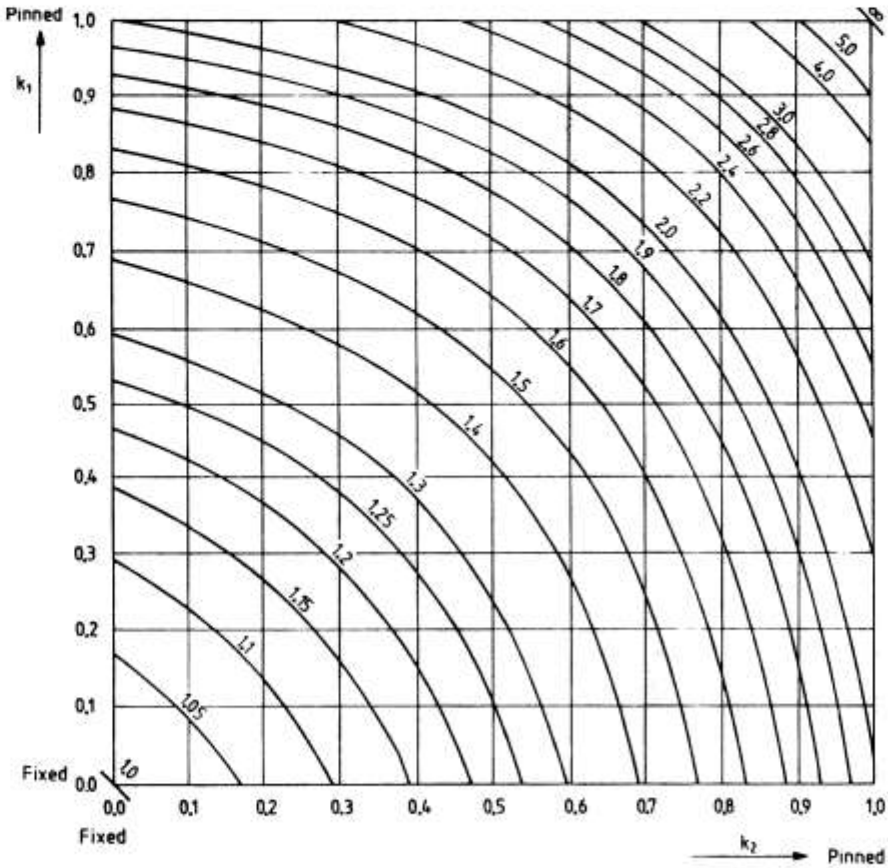
* مساوية لصلابة العمود عندما يكون العمود متصلاً بشكل صلب إلى أساس مناسب.
* مساوية % 10 من صلابة العمود إذا كان اتصال العمود بأساسه إنشائياً.
* مساوية الصفر عندما يكون اتصال العمود بالأساس مفصلياً.



نسبة الطول الفعال L_E/L لعمود من إطار ذي عقد صلبة ممنوع من الانزياح الجانبي

Effective length ratio L_E/L for a column in arigid-jointed frame braced against sidesway

الشكل (4-4a) نسبة الأطوال الفعّالة L_E / L لأعمدة الإطارات ذات العقد الصلبة



نسبة الطول الفعال L_E/L لعمود من إطار ذي عقد صلبة مسموح له بالانزياح الجانبي

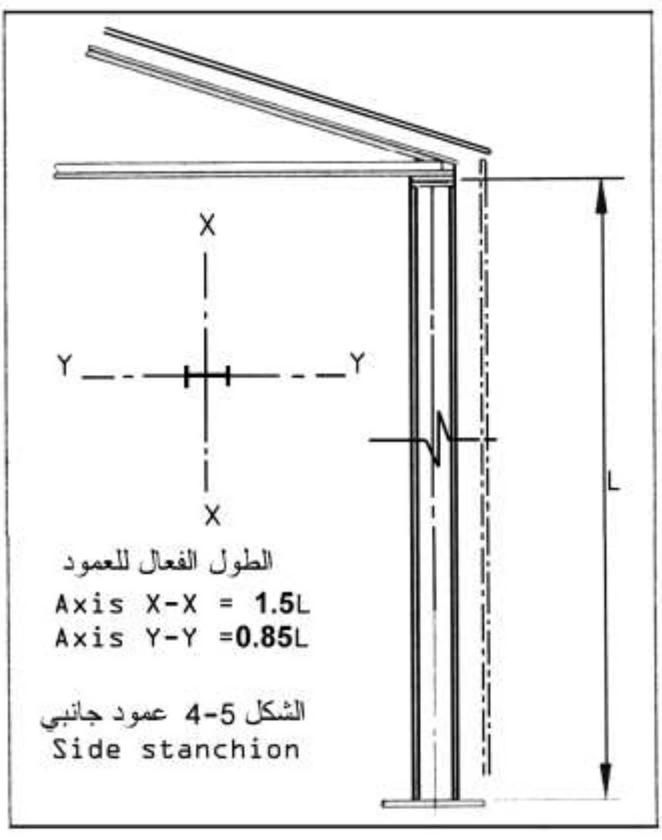
Effective length ratio L_E/L for a column in a rigid-jointed frame with unrestricted sidesway

الشكل (4-4b) نسبة الأطوال الفعّالة L_E / L لأعمدة الإطارات ذات العقد الصلبة

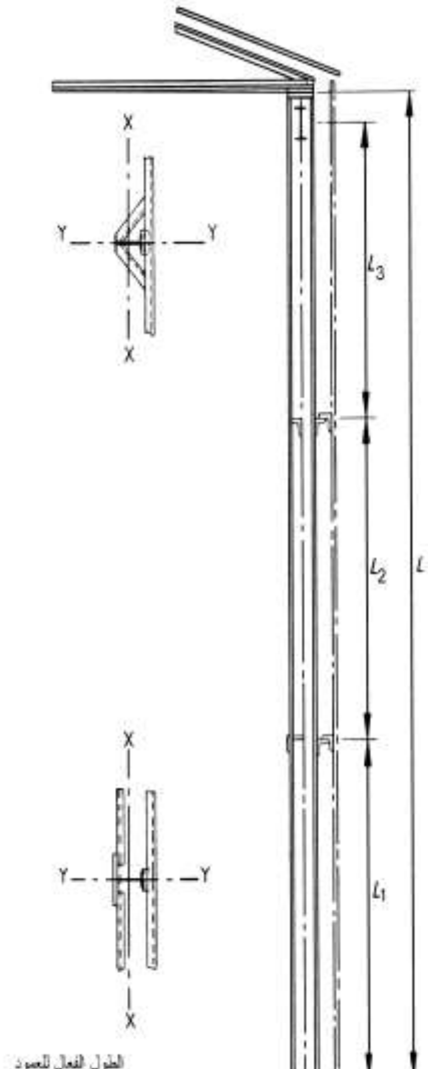
2 - 3 – 4 الأطوال الفعالة لأعمدة المنشآت وحيدة الطابق

يحدد الطول الفعال للأعمدة في المنشآت ذات الطابق الواحد كما هو مبين في الأشكال (9-5-4) شريطة تحقق ما يلي:

* تعمل الأعمدة في مستوي الشكل كأظفار مرتبطة ببعضها بالجوائز الشبكية المكونة للسقف.وعليه فإن الطرف العلوي للعمود غير مقيد في موقعه في هذا المستوي وغير ممنوع من الدوران أيضاً.
* في المستوي العمودي على مستوي الشكل يعد رأس العمود مقيداً في موضعه تماماً بواسطة عنصر يصل رؤوس الأعمدة مع بعضها إلى فتحة مثبتة بروابط أو إلى واسطة تدعيم مناسبة أخرى. ويقيد ذلك أيضاً العمود في موقعه عند الجائز الحامل للرافعة.
* تُعد قاعدة العمود مثبتة في موقعها بشكل فعّال وممنوعة من الدوران في كلا الاتجاهين.



الشكل 5-4 عمود جانبي
Side stanchion



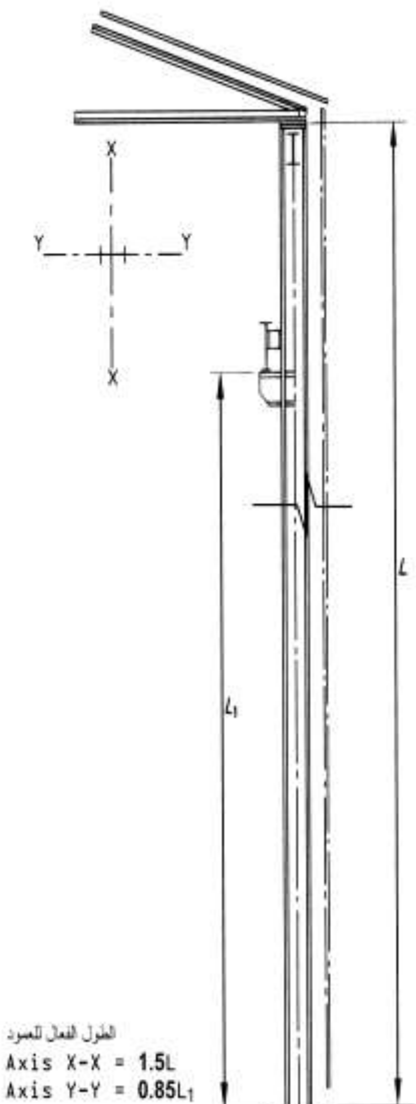
الطول الفعال للعمود

Axis X-X = **1.5**L

Axis Y-Y = **0.85**L_1, **1.0**L_2 or **1.0**L_3 أيها أكبر

الشكل **4-6** عمود جانبي مع قيود

Side stanchion with restraints



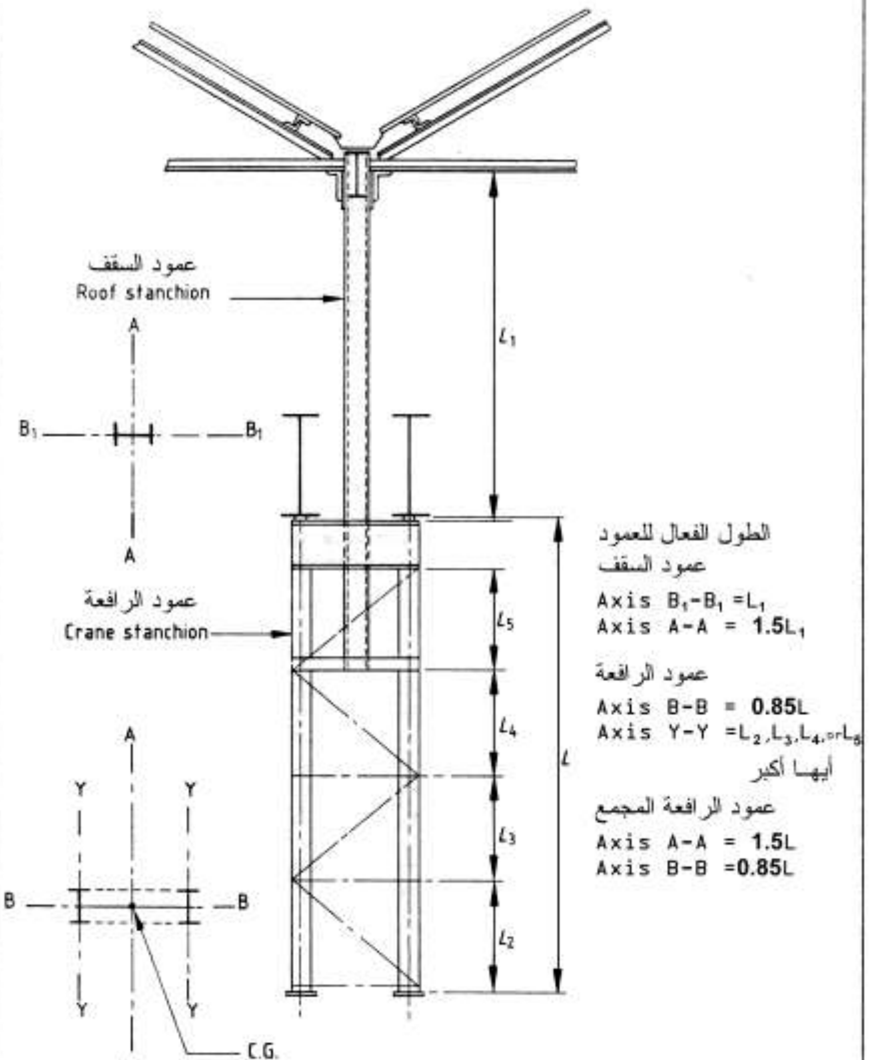
الطول الفعال للعمود

Axis X-X = **1.5**L

Axis Y-Y = **0.85**L_1

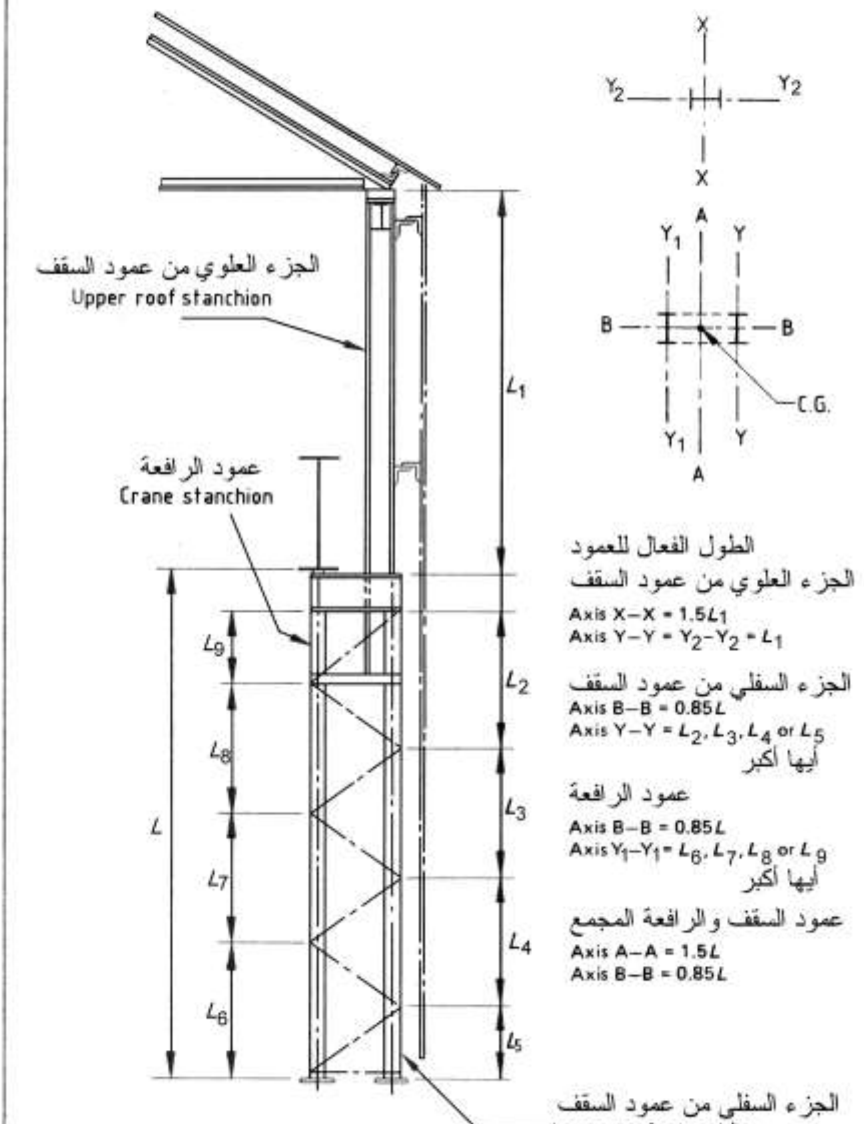
الشكل **4-7** عمود جانبي مع جائز حامل للرافعة

Simple side stanchion with crane gantry



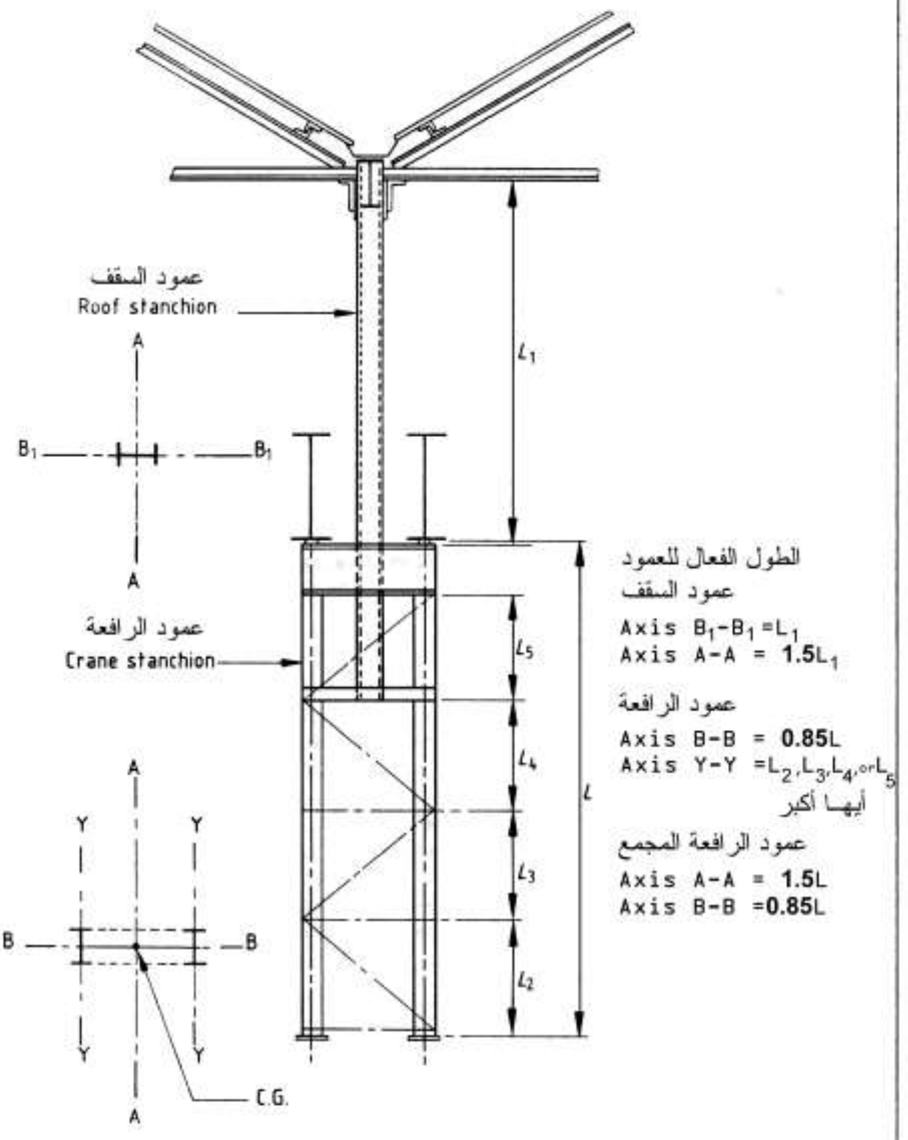
الشكل 4-9 عمود مجمع وسطي مع جائز حامل للرافعة

Compound valley stanchion with crane gantry



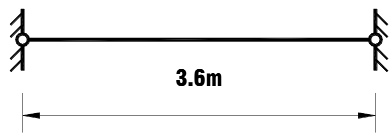
الشكل 4-8 عمود مجمع طرفي مع جائز حامل للرافعة

Compound side stanchion with crane gantry



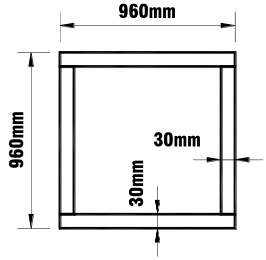
الشكل 9-4 عمود مجمع وسطي مع جائز حامل للرافعة

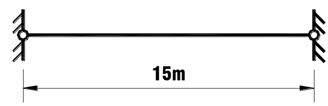
Compound valley stanchion with crane gantry

مثال : (4-1) أوجد قوة تحمل العمود المبين في الشكل أدناه على الضغط المحوري، علماً أنه يتكون من مقطع 203 x 203 x 52 UC ماركة فولاذه 43 وأن طرفي العمود ممسوكان في موقعهما وحران في الدوران	
	
<u>الحـــــل:</u>	
* الطول الفعّال للعمود $L_E = 0.1L = 3.6m$	الجدول (4-4)
* من جداول خواص مقاطع العناصر الفولاذية نجد: $t = 7.2mm$, $B = 204.3\,mm$, $d = 160.8\,mm$, $T = 11\,mm$ $A = 66.4\,cm^2$, $b/T = 8.17$, $d/t = 20.4$, $r_y = 5.16\,cm$	
* نسبة النحافة $\lambda = L_E / r_y = 360/5.16 = 70$	
* بما أن السماكة $T < 16mm$ فإن $p_y = 275 \;\; N/mm^2$ و $\varepsilon = \left(275/p_y\right)^{1/2} = 1.0$	الجدول (2-1)
* إن المقطع ليس نحيفاً لأن : $b/T = 8.17 < 15\varepsilon = 15$ و $d/t = 20.4 < 39\varepsilon = 39$	الجدول (2-2)
* بما أن التحنيب سيتم حول المحور الضعيف للمقطع وباستخدام الجدول (4-2) نجد أنه لتحديد مقاومة الضغط p_c يجب أن نستخدم الجدول (4-3c) مع p_y و λ فنجد : $p_c = 181 \;\; N/mm^2$	الجدول (4-3c)
* وعليه فتحسب طاقة تحمل المقطع وفق العلاقة $P_c = A_g \; p_c$ $P_c = 66.4 \times 100 \times 181 \times 10^{-3} = 1201 \;\; kN$	العلاقة (4-1)

مثال : (4-2)

أوجد قوة تحمل العمود المبين في الشكل أدناه على الضغط المحوري، علماً أن مقطعه العرضي يتكون من مقطع صندوقي مشكل باللحام من صفائح من الفولاذ ماركته *50* وأن طرفي العمود ممسوكان في موضعهما وحرّان في الدوران





<u>الحــــل:</u>

الجدول (4-4)

* الطول الفعّال للعمود $L_E = 1.0\,L = 15\,m$

* مساحة مقطع العمود $A_g = 2 \text{ x } 30\,(960 + 900) = 111600\,mm^2$

عزم عطالة المقطع

$$I = \left(960 \text{ x } 960^3 - 900 \text{ x } 900^3\right)/\,12 = 1.61 \text{ x } 10^{10}\ mm^4$$

* نصف قطر العطالة $r = \left(1.61 \text{ x } 10^{10}\,/\,111600\right)^{1/2} = 380\,mm$

* نسبة النحافة $\lambda = L_E/\text{r} = 15000\,/\,380 = 39.5$

الجدول (2-1)

* بما أن السماكة $T = 30 > 16\,mm$ فإن $p_y = 345\ N\,/\,mm^2$

و $\varepsilon = \left(275\,/\,p_y\right)^{1/2} = 0.9$

* المقطع نحيف لأن

الجدول (2-2)

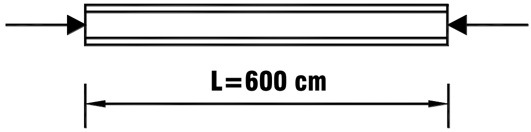
$$b\,/\,T = (960 - 2 \text{ x } 30)\,/\,30 = 30\ > 28\,\varepsilon = 28 \text{ x } 0.9 = 25.2$$

* لذا لا بد من تخفيض المقاومة التصميمية p_y وفقاً للفقرة (2-3)

الجدول (2-3)

معامل تخفيض p_y $= \dfrac{21}{\dfrac{b}{T\varepsilon} - 7} = \dfrac{21}{\dfrac{900}{30 \text{ x } 0.9} - 7} = 0.8$

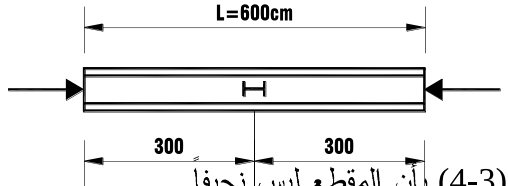
* ونظراً لأن المقطع مشكل باللحام لا بد من تخفيض المقاومة التصميمية أيضاً بـــ $20\ N/mm^2$ وعليه تحسب المقاومة المخفضة كما يلي: $\bar{p}_y = 0.8 \times 345 - 20 = 256\ N/mm^2$ * بالعودة إلى الجدول (4-2) يتبين أنه لتحديد مقاومة الضغط p_c لا بد من استخدام الجدول (4-3b) مع نسبة النحافة والمقاومة التصميمية المخفضة فنجد :	
$p_c = 230\ N/mm^2$	الجدول (4-3b)
* وعليه تحسب قوة تحمل المقطع وفق العلاقة: $P_c = A_g\ p_c = 111600 \times 230 \times 10^{-3} = 25700\ kN$	العلاقة (4-1)

مثال : (4-3) أوجد قوة تحمل العمود المبين في الشكل أدناه على الضغط المحوري، علماً أنه يتكون من مقطع 254 x 254 x 89 UC وأن طرفي العمود ممسوكان في موقعهما وحران في الدوران وأنه مصنوع من فولاذ ماركته 43 . الحـــــل:  * من جداول خواص مقاطع العناصر الفولاذية نجد : $B = 255.9\ mm\ ,\ d = 200.3\ mm\ ,\ T = 17.3\ mm$	

$t = 10.5\,mm$, $r_x = 11.2\,cm$, $r_y = 6.52$, $A = 114\,cm^2$	
* الطول الفعّال للعمود : $L_{Ex} = L_{Ey} = 1.0L = 6000\,mm$	الجدول (4-4)
* بما أن : $T = 17.3\,mm$ فإن : $p_y = 265\,N/mm^2$	الجدول (2-1)
و $\varepsilon = (275/p_y)^{1/2} = 1.02$	
* نسبة النحافة : $\lambda_x = L_{Ex}/r_x = 600/11.2 = 53.6 < 180$ ok	الفقرة (4-1)
$\lambda_y = L_{Ey}/r_y = 600/6.52 = 92 < 180$ ok	
* المقطع ليس نحيفاً لأن :	
$b/T = 255.9 \times 0.5/17.3 = 7.4 < 15\varepsilon = 15 \times 1.02 = 15.3$	الجدول (2-2)
$d/t = 200.3/10.5 = 19.1 < 39\varepsilon = 39 \times 1.02 = 39.8$	
* بالعودة إلى الجدول (4-2) نجد أنه لتحديد مقاومة الضغط p_{cx} حول المحور x يجب أن نستخدم الجدول (4-3b) مع p_y و λ_x فنجد :	الجدول (4-3b)
$p_{cx} = 223\ N/mm^2$	
* بالعودة إلى الجدول (4-2) نجد أنه لتحديد مقاومة الضغط p_{cy} حول المحور y يجب أن نستخدم الجدول (4-3c) مع p_y و λ_y فنجد :	الجدول (4-3c)
$p_{cy} = 136\ N/mm^2$	
* إذاً : $p_c = p_{cy} = 136\ N/mm^2$ وعليه فإن قوة تحمل العمود تحسب كما يلي :	العلاقة (4-1)
$P_c = A_g\,p_c = 114 \times 100 \times 136 \times 10^{-3} = 1550\,kN$	

مثال : (4-4)

أوجد قوة تحمل العمود المدروس في المثال (4-3) على الضغط المحوري وذلك بإضافة قيد لانتقاله الموازي للمحور x في منتصف مجازه :



الحـــــل:

* بينا في المثال (4-3) بأن المقطع ليس نحيفاً
* الطول الفعّال للعمود : $L_{Ex} = 1.0\,L = 600\,cm$

$L_{Ey} = 1.0\left(L/2\right) = 300\,cm$

* نسبة نحافته : $\lambda_x = L_{Ex}/r_x = 53.6$

$\lambda_y = L_{Ey}/r_y = 46$

* كما بينا في المثال (4-3) فإن : $p_{cx} = 223\ N/mm^2$
* بالعودة إلى الجدول (4-2) نجد أنه لتحديد مقاومة الضغط p_{cy} حول المحور y يجب أن نستخدم الجدول (4-3c) مع p_y و λ_y فنجد:

$p_{cy} = 220\ N/mm^2$

* إذاً : $p_c = p_{cy} = 220\ N/mm^2$ وعليه فإن قوة تحمل العمود تحسب كما يلي: — الجدول (4-3c)

$P_c = A_g\,p_c = 114 \times 100 \times 220 \times 10^{-3} = 2508\,kN$ — العلاقة (4-1)

الفصل الخامس

تصميم العناصر المنعطفة
Design of Beams

1 – 5 مقدمـــــة

تعد الجوائز من أكثر العناصر الأساسية في الهندسة الإنشائية حيث تقوم بنقل الأحمال من الأسقف إلى الأعمدة، وتستخدم المقاطع الفولاذية المدرفلة أو المشكّلة على البارد أو المشكّلة باللحام كجوائز ، ويتم اختيار الأنسب منها بناءً على شدة الأحمال المنقولة.

يجب تحقيق كثير من الاشتراطات، إضافة إلى عزم الانعطاف، عند تصميم الجوائز مثل تصنيف المقطع لأن التحنيب الموضعي يلعب دوراً أكبر مما هو عليه الحال في الأعمدة ، حيث تخضع عناصر المقطع المختلفة إلى أنماط مختلفة من الإجهادات. فمثلاً يخضع جناحا مقطع على شكل I في المرحلة المرنة إلى شد أو ضغط منتظم تقريباً، أما جسده فيتعرّض إلى تدرّج في الإجهادات. وكذلك يجب التركيز على الأشكال المختلفة لعدم استقرار الجائز ككل أو أجزاء منه كتلك المعرضة إلى تركيز عال في الإجهادات مثل جسد المقطع عند المساند.

يتحكم واحد أو أكثر من الشروط الحدّية المبينة في الجدول (5-1) بتصميم الجوائز، ولكن عملياً بعضها فقط يحتاج إلى تحقيق كامل.

الجدول (5-1) الشـــروط الحدّية لتصميـــم الجوائـــز	
الحالات الحدّية القصوى	الحالات الحدّية لمرحلة الاستثمار
* التحمل على الانعطاف M_c	* السهوم نتيجة العزم
* التحمل على القصّ P_v	* الفتل نتيجة عزم الفتل
* تحنيب الفتل الجانبي M_b	* الاهتزاز
* تحنيب الجسد P_w	
* تحمّل الجسد P_{cw}	
* التأثير المتبادل بين عزم الانعطاف والقصّ.	
* طاقة تحمّل الفتل M_t	
* التأثير المتبادل بين الانعطاف والفتل.	

من الجدول يتضح أنه يجب تحقيق ما يلي:

* المقاطع الحرجة على العزم الأعظمي والقصّ المرافق أو على القصّ الأعظمي والعزم المرافق.
* مقاومة المقطع على تحنيب الفتل الجانبي ما لم تكن الأجنحة المضغوطة مقيّدة جانبياً تماماً.
* التحنيب الموضعي من خلال تصنيف المقطع كما ورد في الفقرة (2-3).
* تحمّل وتحنيب جسد المقطع عندما يتم تطبيق الأحمال أو ردود الأفعال من خلال الجناح إلى الجسد.
* حالة حدّ السهوم كما ورد في الفقرة (2-1).

يجب أن تؤخذ المقاومة التصميمية p_y كما وردت في الجدول (2-1) مع أخذ عوامل التخفيض الواردة في الجدول (2-3) والخاصة بالمقاطع النحيفة، ولا تخفّض

p_y بمقدار $20\ N/mm^2$ الوارد في الفقرة (4-2) والخاص بالعناصر المضغوطة المكونة باللحام.

2 - 5 طاقة تحمّل القصّ Shear capacity

تحدد طاقة تحمّل المقطع للقصّ وفق العلاقة التالية:

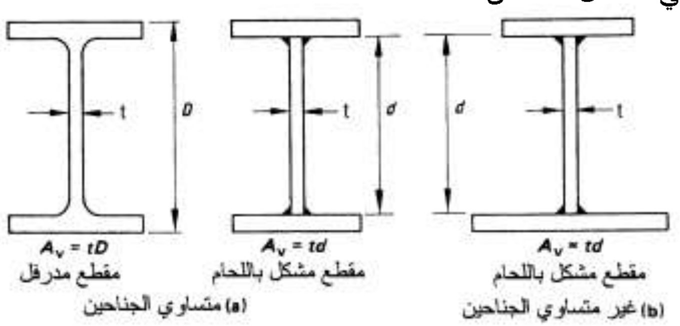
$$P_v = 0.6\, p_y A_v \qquad (5\text{-}1)$$

تحدد مساحة القصّ الفعّالة A_v كما في الشكل (5-1) حسب نوع المقطع مساوية إلى ما يلي:

* tD للمقاطع المدرفلة I و H ومجراية عندما يكون الحمل موازياً للجسد.
* td للمقاطع المجمّعة والصندوقية عندما يكون الحمل موازياً للجسد.
* $0.9A$ للقضبان الصلبة والصفائح.
* $[D/(D+B)]A$ للمقاطع المفرغة الصندوقية عندما يكون الحمل موازياً للجسد.
* $0.6A$ للمقاطع الدائرية المفرغة.

حيث : t سماكة الجسد، B عرض الجناح، D ارتفاع المقطع الكلي، d ارتفاع الجسد، A مساحة المقطع.

ويجب تحقيق المقطع على التحنيب الناتج عن القصّ عندما يكون $d/t > 63\varepsilon$ كما سيرد في الفصل السادس.



الشكل (5-1) مساحة القص الفعّالة لمقاطع نموذجية

5 - 3 طاقة تحمّل العزم Moment capacity

5-3-1 طاقة تحمّل العزم مع قصّ منخفض

عندما تكون القوة القاصّة المطبقة F_v أقل أو تساوي % 60 من طاقة تحمّل القصّ $\left(F_v \le 0.6\, P_v\right)$ فإن طاقة تحمّل العزم تحدد وفق تصنيف المقطع كما يلي:

* للمقاطع اللدنة أو المدمجة

$$M_c = p_y\, S \le 1.2\, p_y\, Z \qquad (5\text{-}2)$$

* للمقاطع نصف المدمجة والنحيفة

$$M_c = p_y\, Z \qquad (5\text{-}3)$$

حيث :

p_y المقاومة التصميمية وتحدد من الجدول (2-1) ويجب أن تخفض للمقاطع النحيفة وفقاً للجدول (3-2).

S و Z معامل المقطع اللدن ومعامل المقطع المرن حول المحور المدروس على الترتيب.

5-3-2 طاقة تحمّل العزم مع قص عالٍ

عندما تزيد القوة القاصّة على 60% من طاقة تحمّل القص $\left(F_v > 0.6 P_v\right)$ فتحدد طاقة تحمّل العزم وفق تصنيف المقطع كما يلي:

* للمقاطع اللدنة أو المدمجة :

$$M_c = p_y\left(\mathrm{S} - \mathrm{S}_v \rho_1\right) \le 1.2\, p_y\, Z \qquad (5\text{-}4)$$

حيث : $\rho_1 = \left(2.5\, F_v / P_v\right) - 1.5$

S_v تساوي معامل المقطع اللدن للمساحة التي تقاوم القص A_v عندما يكون المقطع ذا جناحين متساويين.

S_v تساوي معامل المقطع اللدن مطروحاً منه معامل المقطع اللدن للأجزاء المتبقية من المقطع بعد حذف المساحة المقاومة للقص وذلك عندما يكون المقطع ذا جناحين غير متساويين.

* للمقاطع نصف المدمجة والنحيفة.

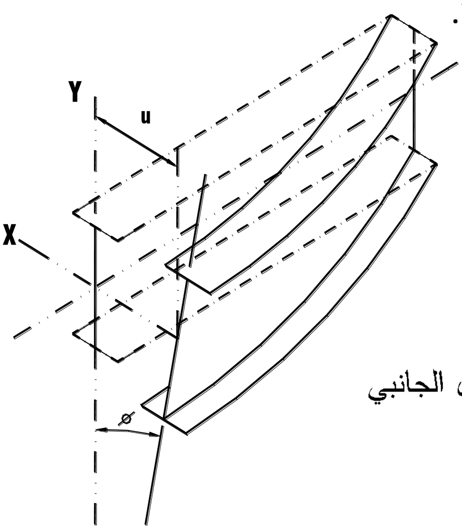
$$M_c = p_y\, Z \qquad (5\text{-}5)$$

تم فرض حد أعلى للعلاقتين (5-2) و (5-4) وذلك لمنع وصول المقطع إلى المرحلة اللدنة تحت تأثير حمولات الاستثمار ويمكن استبدال المعامل 1.2 عندما تكون $S \geq 1.2\, Z$ بالنسبة بين الأحمال المصعدة والأحمال غير المصعدة.

5 - 4 تحنيب الفتل الجانبي Lateral torsional buckling

تتعرض الجوائز المحمّلة بأحمال شاقولية إلى عدم استقرار فتل جانبي يجعلها تخرج من مستوي الأحمال المطبّقة فينتقل المقطع جانبياً مع فتل حول محوره كما في الشكل (5-2). ولا يحدث هذا النوع من التحنيب في أي من الحالات التالية :

* عندما يتعرض الجائز إلى أحمال تنتج عزوماً حول المحور الثانوي للمقطع.
* عندما يزود الجائز بقيود جانبية مستمرة أو متقاربة.
* عندما يكون مقطع الجائز مغلقاً.



الشكل (5-2) تحنيب الفتل الجانبي

5-4-1 القيود الجانبية Lateral restraints

يعد الجناح المضغوط مقيد جانبياً إذا توفر له مسند جانبي ذو قوة تحمّل وصلابة كافيتين لمنع حركته جانبياً بالنسبة للمسند كبلاطة مستندة على الجناح مباشرةً.
ويجب أن يكون المسند الجانبي قادراً على تحمّل قوة قدرها % 2.5 من قوة الضغط العظمى في الجناح الناجمة عن الأحمال المصعّدة على أن يعد هذا الحمل موزع بانتظام على طول الجناح وواقعاً في مستويه. ويجب أن تكون مجمل إنشاءات السقف قادرة على تحمل هذا الحمل الجانبي.

عندما تستدعي الحاجة إلى قيدين جانبيين أو أكثر موزّعة على مسافات على طول مجاز الجائز، يجب أن تكون هذه القيود قادرة على تحمّل قوة لا تقل عن % 2.5 من قوة الضغط العظمى المصعّدة في الجناح، وتقسم هذه القوة بين القيود الجانبية بشكل متناسب مع المسافات بين هذه القيود. يجب أن يتم وصل القيود الجانبية إما إلى جملة تربيط تقوم بدورها بنقل أحمال القيود إلى نقاط استناد الجائز الفعّالة أو إلى جزء جاسئ من المنشئ يقوم بالدور ذاته . ولا يكفي فقط وصل الجوائز المتوازية والتي بحاجة إلى قيود جانبية ببعضها لأن ذلك من شأنه أن يجعلها معتمدة على بعضها البعض.

عندما تستدعي الحاجة إلى ثلاثة قيود جانبية أو أكثر عند مسافات على طول مجاز الجائز فيجب أن يتحمل كل قيد قوة لا تقل عن 1% من قوة الضغط العظمى المصعّدة في الجناح. وعندها يجب أن تتحمل جملة التربيط القوى المنقولة إليها من القيود الجانبية مطبّقة واحدة في كل مرة، أو أن تتحمل القوى الناتجة عن كل القيود الجانبية المنصوص عنها في الفقرة السابقة.

لا يتوجب عادة تحقيق الجوائز الثانوية المقيدة بصفائح التغطية على القوى الناتجة عن تقييد الحبل العلوي للجائز الشبكي أو الإطار الحامل للسقف شريطة وجود جملة

تربيط ذات صلابة كافية في مستوى السقف أو أن تكون صفائح التغطية قادرة على العمل كلوح صلب (diaphragm) .

5-4-2 قيود الفتل Tortional restraints

يعد الجائز مقيد في أية نقطة من طوله ضد الفتل حول محوره الطولي عندما يكون كل من جناحيه مقيداً في موضعه بشكل فعّال بالنسبة للجناح الآخر بواسطة خارجية. ويمكن تأمين قيود الفتل في أية نقطة بواسطة لوح (diaphragm) مناسب أو جملة تربيط تصل بين جوائز متشابهة ، ويمكن تأمين قيود فتل عند نقاط الاستناد عن طريق مدعّمة التحميل (bearing stiffener) . ويجب أن يكون قيد الفتل قادراً على تحمّل عزم فتل ناتج عن قوة قدرها 1% من القوة العظمى المصعّدة في الجناح المضغوط مضروبة بالمسافة بين مركزي ثقلي الجناحين.

5-4-3 أحمال عدم الاستقرار Destabilizing loads

يعد الحمل مسبباً لعدم استقرار الجائز إذا كان مطبّقاً على الجناح ال علوي،وكان الحمل والجناح حرّين بالانتقال جانبياً بالنسبة لمركز ثقل الجائز.

5-4-4 الأطوال الفعّالة للجوائز Effective lengths of beams

يحدد الطول الفعّال للجائز L_E عند دراسة تحنيب الفتل الجانبي كما يلي :

(a) – يحدد الطول الفعّال L_E للجوائز المقيدة جانبياً عند أطرافها فقط من الجدول (5-2) مع حسبان L مساوية لمجاز الجائز. وإذا اختلفت شروط التقييد في كل من الطرفين فيؤخذ متوسط L_E

(b) – عندما يكون الجائز مزوداً بقيود جانبية فعّالة عند مسافات على طوله فيؤخذ الطول الفعّال L_E مساوياً $1.0\ L$ في شروط التحميل العادية ومساوياً $1.2\ L$ عندما تسبب شروط التحميل عدم استقرار الجائز حيث تساوي L المسافة بين القيود الجانبية.

(c) – يجب أخذ شروط التقييد عند المسند بالحسبان عند دراسة جزء الجائز الواقع بين طرفه وأول قيد جانبي. وعندها يؤخذ الطول الفعّال لهذا الجزء كمتوسط القيمتين المشتقتين وفق البند (b) السابق ووفق الجدول (2-5) مع حسبان شروط التقييد عند المسند.

5-4-5 الأطوال الفعّالة للأظفار Effevtive lengths of cantilevers

* عندما يكون الجائز الظفري مزوداً بقيود جانبية للجناح المضغوط أو كان معرّضاً إلى عزم في نهاية الظفر فيعد المجاز بين القيود الجانبية كأنه جائز ويحدد الطول الفعّال كما جاء في الفقرة (5-4-4).
* عندما لا يكون الجائز الظفري مزوداً بقيود جانبية للجناح المضغوط ولا يوجد أي عزم مطبّق عند رأسه فيحدد الطول الفعّال L_E حسب الجدول (5-3).

5 - 5 مقاومة العناصر المنعطفة لتحنيب الفتل الجانبي Lateral torsional buckling resistance

يمكن تلخيص العوامل التي تؤثر على الاستقرار الجانبي كما يلي:

* طول العنصر بين القيود الجانبية.
* شكل مقطع العنصر.
* تغير عزم الانعطاف على طول الجائز.
* شكل القيود الجانبية عند نهايتي الجائز.
* أسلوب تطبيق الأحمال : مطبّقة على الجناح المشدود أم على الجناح المضغوط ومدى مساهمتها في عدم استقرار الجائز.

وبناءً على ذلك يؤثر على تحديد العزم المقاوم لتحنيب الفتل الجانبي M_b العوامل التالية:

- الطول الفعّال L_E:

حيث يؤخذ بالحسبان عند تحديده نوع الجائز ونوع القيود الجانبية عند المساند ونوع الأحمال طبيعية أو مسببة لعدم الاستقرار.

- نسبة النحافة حول المحور الضعيف $\left(\lambda = L_E / r_y\right)$:

تأخذ تأثير الصلابة الجانبية بالحسبان من خلال نصف قطر العطالة r_y حول المحور الضعيف.

- مؤشر الفتل torsional index (x):

يدل على مقدار صلابة الفتل للمقطع العرضي ويمكن أن يؤخذ مساوياً D/T حيث D كامل ارتفاع المقطع و T سماكة جناحه.

- معامل التحنيب buckling parameter (u):

يأخذ بالحسبان نوع المقطع ويشتمل على معامل ورب المقطع (warping). ويؤخذ مساوياً 0.9 للمقاطع المدرفلة I و H ومجاري ومساوياً 1.0 للمقاطع الأخرى.

- معامل النحافة slenderness factor (v):

يأخذ بالحسبان صلابة الفتل، ويحدد للمقاطع المنتظمة ذات الأجنحة المتناظرة حول محور واحد على الأقل من الجدول (5-4) بدلالة λ / x و $N = I_{cf} / \left(I_{cf} + I_{tf}\right)$ حيث I_{cf} و I_{tf} عزمي عطالة الجناحين المضغوط والمشدود على الترتيب حول المحور الثانوي للمقطع. أما في حالة المقاطع الأخرى لا بد من العودة للملحق B.2.5 من الكود BS5950

- معامل تصحيح النحافة slenderness correction factor (n):

يعتمد على تغير العزم على طول المجاز ويحدد وفق الجدول (5-5) بالإضافة إلى الجداول (5-6, 7, 8)

يحدد العزم المقاوم لتحنيب الفتل الجانبي M_b وفق العلاقة التالية:

$$M_b = p_b\, S_x \qquad (5\text{-}6)$$

حيث: S_x معامل المقطع اللدن حول محوره الرئيسي.

p_b مقاومة الانعطاف، وتحدد من الجدولين $(5 - 10{,}11)$ وفقاً لنوع المقطع والمقاومة التصميمية للمادة p_y ونسبة النحافة المكافئة λ_{LT} والتي تعطى وفق العلاقة التالية :

$$\lambda_{LT} = n\, u\, v \lambda \qquad (5\text{-}7)$$

كي يكون عنصر أو جزء من عنصر بين قيدين جانبيين متتاليين آمناً ضد تحنيب الفتل الجانبي. يجب أن تتحقق العلاقة التالية:

$$\overline{M} \le M_b \qquad (5\text{-}8)$$

حيث: $\overline{M}$ عزم انعطاف منتظم مكافئ للعزم الذي يتعرض له العنصر ويحدد وفق العلاقة التالية :

$$\overline{M} = m\, M_A \qquad (5\text{-}9)$$

حيث: M_A عزم الانعطاف الأعظمي الذي يتعرض له العنصر أو جزء العنصر المدروس حول محوره الرئيسي.

m معامل العزم المنتظم المكافئ ويحدد وفق الجدول (5-5) بالإضافة إلى الجدولين (5- 8, 9)

يحدد العزم المقاوم لتحنيب الفتل الجانبي للعناصر المكونة من زاوية واحدة وفق إحدى العلاقات التالية:

$$M_b = 0.8\, p_y\, Z \quad \text{عندما} \quad L / r_{vv} \le 100 \qquad (5\text{-}10)$$

$$M_b = 0.7\, p_y\, Z \quad \text{عندما} \quad 180 \ge L / r_{vv} > 100 \qquad (5\text{-}11)$$

$$M_b = 0.6\, p_y\, Z \quad \text{عندما} \quad 300 \ge L / r_{vv} > 180 \qquad (5\text{-}12)$$

حيث: Z معامل المقطع المرن الأصغر،

r_{vv} نصف قطر العطالة الأصغر للمقطع

L المجاز غير المقيد جانبياً.

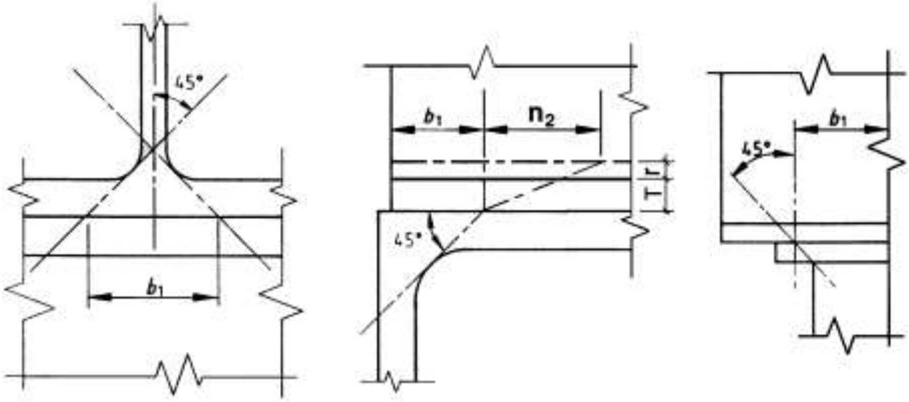
5 - 6 تحمّل وتحنيب الجسد Web bearing and buckling

تغطي هذه الفقرة تحقيق تحمّل جسد المقطع وتحنيبه عندما يتعرض الجناح إلى أحمال موازية لمستوي الجسد. فإذا بينت التحقيقات أن جسد المقطع بمفرده غير كافٍ، لا بد من استخدام مدعّمات مناسبة، وسنأتي على تصميم المدعّمات في بحث الجوائز الصفائحية.

5-6-1 تحمّل الجسد Web bearing

يحدد تحمل الجسد للقوى وردود الفعل المطبقة على الجناح والمارة في مستوي الجسد بالعلاقة التالية :

$$P_{cw} = (b_1 + n_2)t\ p_{yw} \qquad (5\text{-}13)$$



الشكل (5-3) طول سطح التحميل الصلب

حيث: b_1 طول سطح التحميل الصلب وهو الطول الذي لا يتشوه بشكل ملحوظ نتيجة الانعطاف ويحدد بانتشار الحمل من خلال صفيحة التحميل بزاوية °45 وصولاً إلى جناح الجائز كما هو مبين في الشكل (5-3)

n_2 الطول المحدد بنقطة تقاطع انتشار الحمل في الجناح مع خط اتصال الجناح بالجسد وبالنقطة المحددة بسطح التحميل الصلب عندما ينتشر الحمل بميل على مستوي الجناح قدره 2.5 / 1 كما هو مبين في الشكل (5-3).

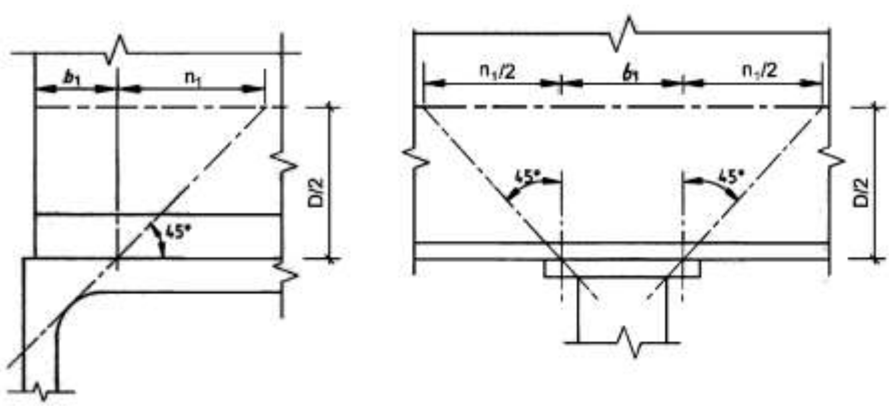
t سماكة الجسد

p_{yw} المقاومة التصميمية لفولاذ الجسد.

5-6-2 تحنيب الجسد Web buckling

تحدد مقاومة الجسد للتحنيب بالعلاقة التالية :

$$P_w = (b_1 + n_1)t\ p_c \qquad (5\text{-}14)$$



الشكل (5-4)

حيث b_1 و t كما في الفقرة السابقة.

n_1 الطول المحدد بخط انتشار الحمل بزاوية $45°$ في جسد العنصر حتى منتصف ارتفاع المقطع كما هو مبين في الشكل (4-5).

p_c مقاومة الضغط وتحدد من الجداول (4-3c) بالاستناد إلى نسبة نحافة الجسد λ

$\lambda = 2.5\, d / t$ (d ارتفاع جسد المقطع) شريطة أن يكون الجناح الذي يطبق الحمل عليه ممنوع من الدوران بالنسبة للجسد وممنوع من الانتقال الجانبي بالنسبة للجناح الآخر.

أما إذا كانت الجناح ممنوعة فقط من الانتقال الجانبي بالنسبة للجناح الآخر مع بعض الحرية في الدوران فتحدد λ وفق المعايير التالية:

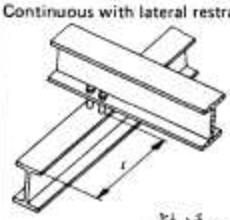
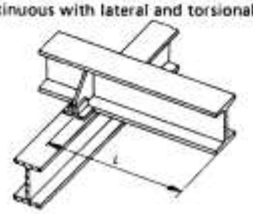
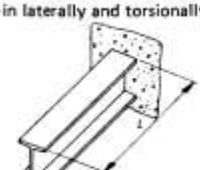
* يؤخذ نصف قطر عطالة مساحة الجسد الفعّالة محددة بدلالة $(t,\ n_1,\ b_1)$حول المحور الطولي للجسد.
* $L_E = 0.7\, d$ عندما يكون الجناح المحمّل ممنوعاً من الدوران عند نقطة تطبيق الحمل.
* $L_E = d$ عندما يكون الجناح المحمّل ليس ممنوعاً تماماً من الدوران.

Effective length L_E for beams — الجدول (5-2) الأطوال الفعالة للجوائز

Conditions of restraint at supports شروط التقييد عند المساند		Loading conditions شروط التحميل	
		أحمال طبيعية **Normal**	أحمال عدم استقرار **Destabilizing**
الجناح المضغوط مقيد جانبيا الجائز مقيد تماما ضد الفتل Compression flange laterally restrained Beam fully restrained against torsion	Both flanges fully restrained against rotation on plan كلا الجناحين مقيد تماما ضد الدوران في المستوي	$0.7L$	$0.85L$
	Both flanges partially restrained against rotation on plan كلا الجناحين مقيد جزئيا ضد الدوران في المستوي	$0.85L$	$1.0L$
	Both flanges free to rotate on plan كلا الجناحين حر في الدوران	$1.0L$	$1.2L$
الجناح المضغوط غير مقيد جانبيا كلا الجناحين حر في الدوران Compression flange laterally unrestrained Both flanges free to rotate on plan	Restraint against torsion provided only by positive connection of bottom flange to supports قيود الفتل مؤمنة فقط بواسطة الوصلات الموجبة للجناح السفلي إلى المساند	$1.0L + 2D$	$1.2L + 2D$
	Restraint against torsion provided only by dead bearing of bottom flange on supports قيود الفتل مؤمنة فقط بواسطة التحميل الميت للجناح السفلي إلى المساند	$1.2L + 2D$	$1.4L + 2D$

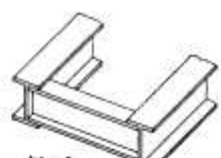
D is the depth of the beam. — D الارتفاع الكلي للجائز

Effective length, L_E, for cantilever of length L — الجدول(3-5)الأطوال الفعالة للأظفار

Restraint conditions شروط التقييد: At support عند المسند	At tip عند رأس الظفر	Loading conditions شروط التحميل: Normal أحمال طبيعية	Destabilizing أحمال عدم استقرار
مستمر مع قيد جانبي فقط Continuous with lateral restraint only 	Free حر	3.0L	7.5L
	Laterally restrained on top flange only مقيد جانبياً عند الجناح العلوي فقط	2.7L	7.5L
	Torsionally restrained only مقيد ضد الفتل فقط	2.4L	4.5L
	Laterally and torsionally restrained مقيد جانبياً وضد الفتل	2.1L	3.6L
مستمر مع قيد جانبي وقيد فتل Continuous with lateral and torsional restraint 	Free حر	1.0L	2.5L
	Laterally restrained on top flange only مقيد جانبياً عند الجناح العلوي فقط	0.9L	2.5L
	Torsionally restrained only مقيد ضد الفتل فقط	0.8L	1.5L
	Laterally and torsionally restrained مقيد جانبياً وضد الفتل	0.7L	1.2L
ممنوع من الانتقال الجانبي والفتل Built-in laterally and torsionally 	Free حر	0.8L	1.4L
	Laterally restrained on top flange only مقيد جانبياً عند الجناح العلوي فقط	0.7L	1.4L
	Torsionally restrained only مقيد ضد الفتل فقط	0.6L	0.6L
	Laterally and torsionally restrained مقيد جانبياً وضد الفتل	0.5L	0.5L

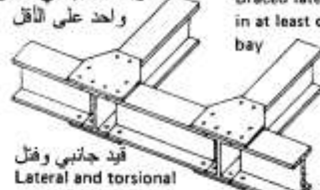


قيد للجناح العلوي
Top flange restraint



قيد فتل
Torsional restraint

مربط جانبيا في مجاز واحد على الأقل
Braced laterally in at least one bay



قيد جانبي وفتل
Lateral and torsional restraint

عندما تستخرج الأطوال الفعالة L_E من هذا الجدول يجب أن يؤخذ معمل تصحيح النحافة n ومعامل العزم المنتظم المكافئ m مساويين 1.0

الجدول (4-5) معامل النحافة للمقاطع المنتظمة ذات الأجنحة

Slenderness factor v for flanged beams of uniform section

		ضغط / شد							ضغط / شد		
$\frac{\lambda}{x}$ \ N	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
0.5	0.79	0.81	0.84	0.88	0.93	1.00	1.11	1.28	1.57	2.20	12.67
1.0	0.78	0.80	0.83	0.87	0.92	0.99	1.10	1.27	1.53	2.11	6.36
1.5	0.77	0.80	0.82	0.86	0.91	0.97	1.08	1.24	1.48	1.98	4.27
2.0	0.76	0.78	0.81	0.85	0.89	0.96	1.06	1.20	1.42	1.84	3.24
2.5	0.75	0.77	0.80	0.83	0.88	0.93	1.03	1.16	1.35	1.70	2.62
3.0	0.74	0.76	0.78	0.82	0.86	0.91	1.00	1.12	1.29	1.57	2.21
3.5	0.72	0.74	0.77	0.80	0.84	0.89	0.97	1.07	1.22	1.46	1.93
4.0	0.71	0.73	0.75	0.78	0.82	0.86	0.94	1.03	1.16	1.36	1.71
4.5	0.69	0.71	0.73	0.76	0.80	0.84	0.91	0.99	1.11	1.27	1.55
5.0	0.68	0.70	0.72	0.75	0.78	0.82	0.88	0.95	1.05	1.20	1.41
5.5	0.66	0.68	0.70	0.73	0.76	0.79	0.85	0.92	1.01	1.13	1.31
6.0	0.65	0.67	0.69	0.71	0.74	0.77	0.82	0.89	0.97	1.07	1.22
6.5	0.64	0.65	0.67	0.70	0.72	0.75	0.80	0.86	0.93	1.02	1.14
7.0	0.63	0.64	0.66	0.68	0.70	0.73	0.78	0.83	0.89	0.97	1.08
7.5	0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.72	0.76	0.80	0.86	0.93	1.02
8.0	0.60	0.62	0.63	0.65	0.67	0.70	0.74	0.78	0.83	0.89	0.98
8.5	0.59	0.60	0.62	0.64	0.66	0.68	0.72	0.76	0.80	0.86	0.93
9.0	0.58	0.59	0.61	0.63	0.64	0.67	0.70	0.74	0.78	0.83	0.90
9.5	0.57	0.58	0.60	0.61	0.63	0.65	0.68	0.72	0.76	0.80	0.86
10.0	0.56	0.57	0.59	0.60	0.62	0.64	0.67	0.70	0.74	0.78	0.83
11.0	0.54	0.55	0.57	0.58	0.60	0.61	0.64	0.67	0.70	0.73	0.78
12.0	0.53	0.54	0.55	0.56	0.58	0.59	0.61	0.64	0.66	0.70	0.73
13.0	0.51	0.52	0.53	0.54	0.56	0.57	0.59	0.61	0.64	0.66	0.69
14.0	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.57	0.59	0.61	0.63	0.66
15.0	0.49	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.55	0.57	0.59	0.61	0.63
16.0	0.47	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.55	0.57	0.59	0.61
17.0	0.46	0.47	0.48	0.49	0.49	0.50	0.52	0.53	0.55	0.57	0.58
18.0	0.45	0.46	0.47	0.47	0.48	0.49	0.50	0.52	0.53	0.55	0.56
19.0	0.44	0.45	0.46	0.46	0.47	0.48	0.49	0.50	0.52	0.53	0.55
20.0	0.43	0.44	0.45	0.45	0.46	0.47	0.48	0.49	0.50	0.51	0.53

v should be determined from the general formulae given in **B.2.5**, BS5950 ؛

(a) for sections with LIPPED flanges (e.g. gantry girders composed of channel + universal beam); and

(b) for intermediate values to the right of the stepped line in the table.

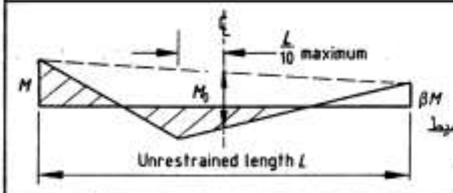
الجدول(5-5)معامل العزم المكافئ m ومعامل تصحيح النحافة n

Use of m and n factors for members of uniform section

Description		عناصر غير خاضعة لأحمال عدم الاستقرار **Members *not* subject to destabilizing loads**		عناصر خاضعة لأحمال عدم الاستقرار **Members subject to destabilizing loads**	
		m	n	m	n
عناصر محملة بين القيود الجانبية المتتالية Members loaded between adjacent lateral restraints	مقاطع متساوية الجناحين Sections with equal flanges	1.0	من الجدولين (5-6 و 7)	1.0	1.0
	مقاطع غير متساوية الجناحين Sections with unequal flanges	1.0	1.0	1.0	1.0
عناصر غير محملة بين القيود الجانبية المتتالية Members not loaded between adjacent lateral restraints	مقاطع متساوية الجناحين Sections with equal flanges	من الجدول 5-9	1.0	1.0	1.0
	مقاطع غير متساوية الجناحين Sections with unequal flanges	1.0	1.0	1.0	1.0
أظفار بدون قيود جانبية في المجاز Cantilevers without intermediate lateral restraints		1.0	1.0	1.0	1.0

الجدول(5-6)معامل تصحيح النحافة (n) للعناصر المحملة بشكل أساسي في الخمس الوسطي من الطول غير المقيد جانبيا

Slenderness correction factor, *n*, for members with applied loading substantially concentrated within the middle fifth of the unrestrained length



– العزوم الشادة الألياف العلوية موجبة
– β معرّفة في الجدول (5-9)
– M_o العزم في منتصف جائز استناده بسيط مجازه يساوي الطول غير المقيد

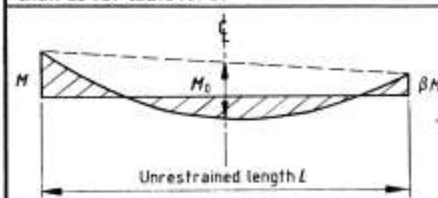
$\gamma = M/M_o$	β positive						β negative				
	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.0	−0.2	−0.4	−0.6	−0.8	−1.0
+50.00	1.00	0.96	0.92	0.87	0.82	0.77	0.72	0.67	0.66	0.66	0.65
+10.00	0.99	0.99	0.94	0.90	0.85	0.80	0.75	0.69	0.68	0.68	0.67
+5.00	0.98	0.98	0.97	0.93	0.89	0.84	0.79	0.73	0.71	0.70	0.70
+2.00	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.89	0.84	0.79	0.77	0.76
+1.50	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92	0.90	0.85	0.80	0.80
+1.00	0.93	0.92	0.92	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92
+0.50	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.88	0.88	0.88
0.00	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
−0.10	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
−0.20	0.83	0.83	0.83	0.84	0.84	0.85	0.85	0.85	0.86	0.86	0.86
−0.30	0.81	0.82	0.82	0.83	0.83	0.84	0.85	0.85	0.86	0.86	0.87
−0.40	0.79	0.80	0.81	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.85	0.86	0.87
−0.50	0.77	0.78	0.79	0.80	0.82	0.83	0.85	0.86	0.86	0.87	0.88
−0.60	0.62	0.66	0.72	0.77	0.80	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88
−0.70	0.56	0.56	0.61	0.67	0.73	0.79	0.83	0.85	0.87	0.88	0.89
−0.80	0.56	0.53	0.54	0.59	0.65	0.71	0.77	0.83	0.89	0.90	0.90
−0.90	0.59	0.57	0.54	0.53	0.57	0.64	0.71	0.77	0.84	0.88	0.91
−1.00	0.62	0.58	0.54	0.52	0.54	0.59	0.66	0.72	0.80	0.85	0.92
−1.10	0.66	0.62	0.57	0.54	0.54	0.57	0.63	0.68	0.76	0.83	0.89
−1.20	0.70	0.66	0.60	0.55	0.54	0.55	0.60	0.65	0.73	0.80	0.87
−1.30	0.73	0.69	0.63	0.57	0.55	0.54	0.57	0.61	0.69	0.77	0.83
−1.40	0.74	0.70	0.64	0.58	0.56	0.54	0.55	0.60	0.66	0.74	0.81
−1.50	0.75	0.70	0.64	0.59	0.56	0.54	0.55	0.59	0.65	0.73	0.80
−1.60	0.76	0.72	0.65	0.60	0.57	0.55	0.55	0.58	0.64	0.72	0.80
−1.70	0.77	0.74	0.66	0.61	0.58	0.56	0.55	0.58	0.63	0.70	0.78
−1.80	0.79	0.77	0.68	0.63	0.59	0.56	0.56	0.57	0.62	0.69	0.76
−1.90	0.80	0.79	0.69	0.64	0.60	0.57	0.56	0.57	0.61	0.67	0.75
−2.00	0.81	0.81	0.70	0.65	0.61	0.58	0.56	0.56	0.60	0.66	0.74
−5.00	0.93	0.89	0.83	0.77	0.72	0.67	0.64	0.61	0.60	0.62	0.65
−50.00	0.99	0.95	0.90	0.86	0.79	0.74	0.70	0.67	0.64	0.63	0.65
Infinity	1.00	0.96	0.91	0.86	0.82	0.77	0.72	0.68	0.65	0.65	0.65

– تحدد *n* وفق هذا الجدول للعناصر منتظمة المقطع

– عندما تستخدم n من هذا الجدول تؤخذ $m = 1.00$.

الجدول (5-7) معامل تصحيح النحافة (n) للعناصر المحملة خلافاً لما في الجدول (5-6)

Slenderness correction factor, n, for members with applied loading other than as for table (5-6)



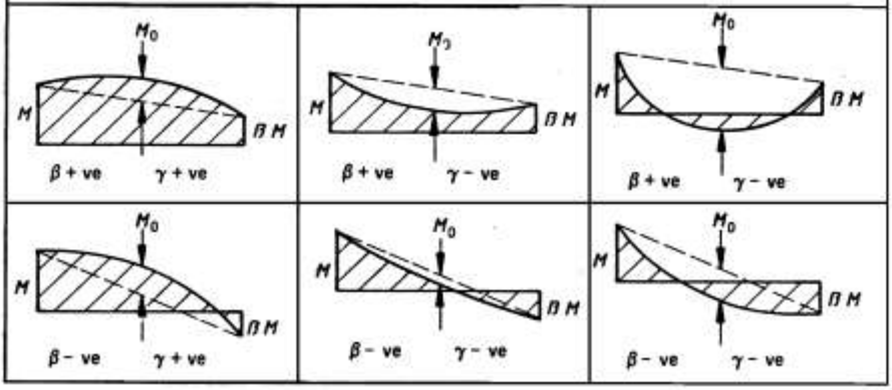
– العزوم الشادة الألياف العلوية موجبة
– β معرّفة في الجدول (5-9)
– M_0 العزم في منتصف جائز استناده بسيط مجازه يساوي الطول غير المقيد

$\gamma = M/M_0$	β positive						β negative				
	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.0	−0.2	−0.4	−0.6	−0.8	−1.0
+50.00	1.00	0.96	0.92	0.87	0.83	0.77	0.72	0.67	0.66	0.66	0.65
+10.00	0.99	0.98	0.95	0.91	0.86	0.81	0.76	0.70	0.68	0.68	0.67
+5.00	0.99	0.98	0.97	0.94	0.90	0.85	0.80	0.75	0.71	0.70	0.70
+2.00	0.98	0.98	0.97	0.96	0.94	0.92	0.90	0.86	0.82	0.78	0.76
+1.50	0.97	0.97	0.97	0.96	0.95	0.93	0.92	0.89	0.86	0.83	0.79
+1.00	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.94	0.93	0.93	0.91	0.89
+0.50	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.92
0.00	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
−0.10	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
−0.20	0.92	0.92	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.93
−0.30	0.91	0.91	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94
−0.40	0.90	0.90	0.91	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93
−0.50	0.89	0.90	0.91	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
−0.60	0.71	0.77	0.84	0.87	0.89	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
−0.70	0.57	0.64	0.70	0.77	0.82	0.87	0.89	0.91	0.92	0.92	0.91
−0.80	0.47	0.52	0.59	0.67	0.73	0.80	0.86	0.90	0.92	0.92	0.92
−0.90	0.47	0.46	0.50	0.58	0.65	0.73	0.80	0.87	0.90	0.90	0.90
−1.00	0.50	0.48	0.46	0.51	0.58	0.66	0.73	0.81	0.87	0.89	0.89
−1.10	0.54	0.51	0.48	0.49	0.54	0.61	0.69	0.77	0.83	0.87	0.88
−1.20	0.57	0.54	0.50	0.47	0.51	0.56	0.64	0.73	0.80	0.84	0.87
−1.30	0.61	0.56	0.52	0.47	0.49	0.53	0.61	0.70	0.77	0.82	0.86
−1.40	0.64	0.59	0.55	0.49	0.48	0.51	0.58	0.67	0.74	0.79	0.85
−1.50	0.67	0.62	0.57	0.51	0.47	0.49	0.56	0.64	0.71	0.77	0.84
−1.60	0.69	0.64	0.59	0.52	0.48	0.50	0.55	0.63	0.69	0.76	0.83
−1.70	0.71	0.66	0.60	0.54	0.50	0.51	0.55	0.61	0.68	0.74	0.82
−1.80	0.74	0.69	0.62	0.55	0.51	0.51	0.54	0.60	0.66	0.73	0.81
−1.90	0.76	0.71	0.63	0.57	0.53	0.52	0.54	0.58	0.65	0.71	0.80
−2.00	0.78	0.73	0.65	0.58	0.54	0.53	0.53	0.57	0.63	0.70	0.79
−5.00	0.91	0.86	0.80	0.74	0.70	0.65	0.62	0.59	0.58	0.61	0.67
−50.00	0.99	0.95	0.89	0.84	0.79	0.74	0.70	0.66	0.63	0.62	0.65
Infinity	1.00	0.96	0.91	0.86	0.82	0.77	0.72	0.68	0.65	0.65	0.65

– تحدد n وفق هذا الجدول للعناصر منتظمة المقطع

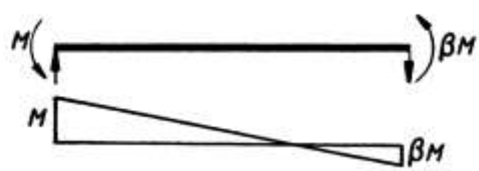
– عندما تستخدم n من هذا الجدول تُؤخذ $m = 1.00$.

Moment diagram between adjacent points of lateral restraint　　الجدول (5-8) مخطط العزم بين نقطتي استناد جانبي



الجدول (5-9) معامل العزم المنتظم المكافئ

Equivalent uniform moment factor, *m*

	β	m
Beta positive β موجبة 	1.0	1.00
	0.9	0.95
	0.8	0.90
	0.7	0.85
	0.6	0.80
	0.5	0.76
	0.4	0.72
	0.3	0.68
	0.2	0.64
	0.1	0.60
	0.0	0.57
Beta negative β سالبة 	−0.1	0.54
	−0.2	0.51
	−0.3	0.48
	−0.4	0.45
	−0.5 to −1.0	0.43

- تحدد *m* من هذا الجدول للجوائز منتظمة المقطع ذات الجناحين المتساويين
- β هي النسبة بين العزم الأصغر والعزم الأكبر المطبقين في طرفي المجاز غير المقيد.

الجدول (10-5) مقاومة الإنعطاف للمقاطع المدرفلة

Bending strength, p_b, (in N/mm^2) for rolled sections

λ_{LT} \ p_y	245	265	275	325	340	355	415	430	450
30	245	265	275	325	340	355	408	421	438
35	245	265	273	316	328	341	390	402	418
40	238	254	262	302	313	325	371	382	397
45	227	242	250	287	298	309	350	361	374
50	217	231	238	272	282	292	329	338	350
55	206	219	226	257	266	274	307	315	325
60	195	207	213	241	249	257	285	292	300
65	185	196	201	225	232	239	263	269	276
70	174	184	188	210	216	222	242	247	253
75	164	172	176	195	200	205	223	226	231
80	154	161	165	181	186	190	204	208	212
85	144	151	154	168	172	175	188	190	194
90	135	141	144	156	159	162	173	175	178
95	126	131	134	144	147	150	159	161	163
100	118	123	125	134	137	139	147	148	150
105	111	115	117	125	127	129	136	137	139
110	104	107	109	116	118	120	126	127	128
115	97	101	102	108	110	111	117	118	119
120	91	94	96	101	103	104	108	109	111
125	86	89	90	95	96	97	101	102	103
130	81	83	84	89	90	91	94	95	96
135	76	78	79	83	84	85	88	89	90
140	72	74	75	78	79	80	83	84	84
145	68	70	71	74	75	75	78	79	79
150	64	66	67	70	70	71	73	74	75
155	61	62	63	66	66	67	69	70	70
160	58	59	60	62	63	63	65	66	66
165	55	56	57	59	60	60	62	62	63
170	52	53	54	56	56	57	59	59	59
175	50	51	51	53	54	54	56	56	56
180	47	48	49	51	51	51	53	53	53
185	45	46	46	48	49	49	50	50	51
190	43	44	44	46	46	47	48	48	48
195	41	42	42	44	44	44	46	46	46
200	39	40	40	42	42	42	43	44	44
210	36	37	37	38	39	39	40	40	40
220	33	34	34	35	35	36	36	37	37
230	31	31	31	32	33	33	33	34	34
240	29	29	29	30	30	30	31	31	31
250	27	27	27	28	28	28	29	29	29

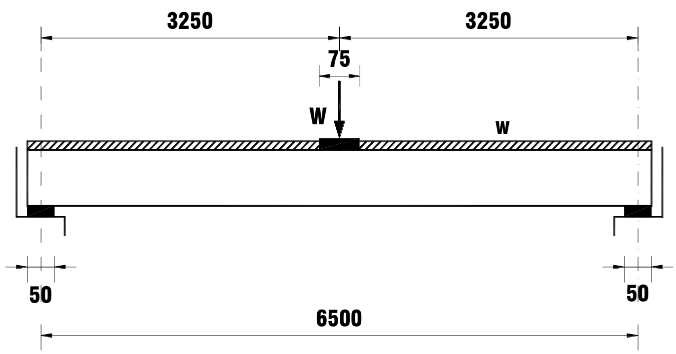
الجدول (5-11) مقاومة الانعطاف للمقاطع الملحومة

Bending strength, p_b, (in N/mm^2) for welded sections

λ_{LT} \ p_y	245	265	275	325	340	355	415	430	450
30	245	265	275	325	340	355	401	412	427
35	245	265	272	307	317	328	368	378	391
40	231	244	250	282	292	301	337	346	358
45	212	224	230	259	268	276	308	316	327
50	196	207	212	238	246	253	282	288	297
55	180	190	195	219	225	232	257	263	275
60	167	176	180	201	207	212	245	253	264
65	154	162	166	188	196	204	235	242	251
70	142	150	155	182	189	196	224	230	238
75	135	145	151	175	182	188	212	218	225
80	131	141	146	168	174	179	201	205	211
85	127	136	140	160	165	171	188	190	194
90	123	131	135	152	157	162	173	175	178
95	118	125	129	144	147	150	159	161	163
100	113	120	123	134	137	139	147	148	150
105	109	115	117	125	127	129	136	137	139
110	104	107	109	116	118	120	126	127	128
115	97	101	102	108	110	111	117	118	119
120	91	94	96	101	103	104	108	109	111
125	86	89	90	95	96	97	101	102	103
130	81	83	84	89	90	91	94	95	96
135	76	78	79	83	84	85	88	89	90
140	72	74	75	78	79	80	83	84	84
145	68	70	71	74	75	75	78	79	79
150	64	66	67	70	70	71	73	74	75
155	61	62	63	66	66	67	69	70	70
160	58	59	60	62	63	63	65	66	66
165	55	56	57	59	60	60	62	62	63
170	52	53	54	56	56	57	59	59	59
175	50	51	51	53	54	54	56	56	56
180	47	48	49	51	51	51	53	53	53
185	45	46	46	48	49	49	50	50	51
190	43	44	44	46	46	47	48	48	48
195	41	42	42	44	44	44	46	46	46
200	39	40	40	42	42	42	43	44	44
210	36	37	37	38	39	39	40	40	40
220	33	34	34	35	35	36	36	37	37
230	31	31	31	32	33	33	33	34	34
240	29	29	29	30	30	30	31	31	31
250	27	27	27	28	28	28	29	29	29

مثال : (1-5)

يبين الشكل أدناه جائزاً مستنداً استناداً بسيطاً وصلباً عند طرفيه. طول منطقة الاستناد في كل طرف 50 mm. صمم الجائز من فولاذ ماركته 43 تحت تأثير الأحمال المبينة في الشكل مع العلم أن الجناح العلوي ممنوع من الانتقال الجانبي على كامل طول الجائز وأن الحمل المركز مطبق على مسافة 75mm



<u>الحـــــل :</u>

* الأحمال غير المصعّدة

– الميتة $w_d = 15\, kN/m$ موزعة بانتظام و $W_d = 40\, kN$ مركز.

– الحية $w_i = 30\, kN/m$ موزعة بانتظام و $W_i = 50\, kN$ مركز.

الجدول (1-2)

* عوامل التصعيد $\gamma_{fd} = 1.4$ ، $\gamma_{fi} = 1.6$

* الأحمال المصعّدة

موزع بانتظام $w' = 1.4 \text{ x } 15 + 1.6 \text{ x } 30 = 69\, kN/m$

$W' = 1.4 \text{ x } 40 + 1.6 \text{ x } 50 = 136\, kN$ مركّز

* مجاز الجائز $L = 6.5\, m$

* العزم التصميمي

$$M = w' L^2 / 8 + W' L / 4$$

$$M = 69 \text{ x } 6.5^2 / 8 + 136 \text{ x } 6.5 / 4 = 585\, kNm$$

* القص التصميمي

– في طرف الجائز

$$F_{ve} = \left(w'L + W'\right)/2 = \left(69 \text{ x } 6.5 + 136\right)/2 = 292\, kN$$

– في منتصف الجائز

$$F_{vc} = F_{ve} - w'L/2 = 292 - 69 \text{ x } 6.5/2 = 67.8\, kN$$

* لنجرب المقطع $533 \text{ x } 210 \text{ x } 92\ UB$

$D = 533.1\, mm$, $B = 209.3\, mm$, $t = 10.2\, mm$

$T = 15.6\, mm$, $\text{d} = 476.5\, mm$, $\text{I} = 55400\, \text{cm}^4$, $Z = 2080\, cm^3$

$S = 2370\, cm^3$, $r_y = 4.51 cm$, $r = 12.7\, mm$ (نصف قطر الجذر)

الجدول (2-1) * بما أن $T = 15.6\, mm$ فإن $p_y = 275\, N/mm^2$ و

$$\varepsilon = \left(275/p_y\right)^{1/2} = 1$$

* المقطع مدمج لأن:

الجدول (2-2)

$$b/T = B/2T = 209.3/2 \text{ x } 15.6 = 6.7 < 9.5\,\varepsilon = 9.5$$

$$d/t = 476.5/10.2 = 46.7 < 98\,\varepsilon = 98$$

يكفي أن نتأكد من أن المقطع مدمج لأن الجائز ذو استناد بسيط ولا يحتاج إلى أية طاقة دوران لدنة.

* لا حاجة لتحقيق تحنيب القص لأن:

الفقرة (5-2)

$d/t = 46.7 < 63\varepsilon = 63$

* تحقيق المقطع في منتصف المجاز:

الفقرة (5-2)

– مساحة القص $A_v = tD = 10.2 \text{ x } 533.1 = 5438\, mm^2$

– طاقة تحمّل القص

العلاقة (5-1)

$P_v = 0.6\, p_y\, A_v = 0.6 \text{ x } 275 \text{ x } 5738 \text{ x } 10^{-3}$

$= 897\, kN > F_{vc} = 67.8\, kN \quad \text{o.k.}$

– طاقة تحمّل العزم: بما أن $F_{vc} < 0.6\, P_v$ فتحدد طاقة تحمّل العزم بالعلاقة التالية:

العلاقة (5-2)

$M_c = p_y\, S \le 1.2\, p_y\, Z$

$M_c = 275 \text{ x } 2370 \text{ x } 10^{-3} = 652\, kN\, m$

$M_c = 652\, kNm \le 1.2 \text{ x } 275 \text{ x } 2080 \text{ x } 10^{-3} = 686\, kNm$

$M_c = 652\, kN\, m > M = 585\, kN\, m$ (العزم التصميمي) $o.k.$

* تحقيق المقطع عند طرف الجائز:

– العزم التصميمي $M_c = 652\, kN\, m > M = 0 \quad o.k.$

– القصّ $P_v = 897\, kN > \text{F}_{\text{ve}} = 292\, kN \quad o.k.$

* تحقيق تحمّل جسد المقطع عند المسند:

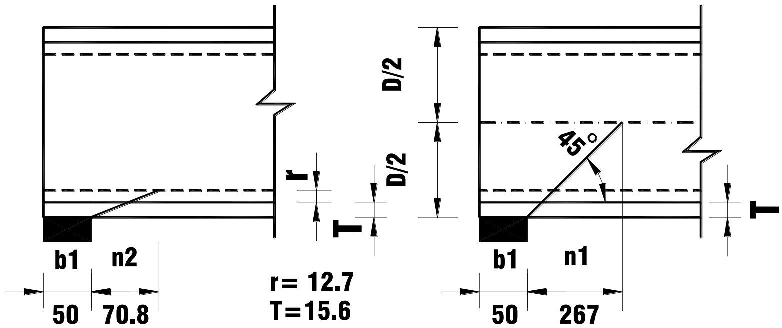
– كما هو مبين في الشكل أدناه فإن

$b_1 = 50\, mm\ ,\ n_2 = 2.5 \text{ x } (r + T) = 2.5 \text{ x } (12.7 + 15.6) = 70.8\, mm$

– طاقة تحمّل الجسد

العلاقة $P_{cw} = (b_1 + n_2)\, t\, p_{yw}$

(5-13) $P_{cw} = (50 + 70.8) \text{ x } 10.2 \text{ x } 275 \text{ x } 10^{-3} = 339\, kN > F_{ve} = 292\, kN \quad o.k.$



* تحقيق تحنيب الجسد

- كما هو مبين في الشكل أعلاه فإن :

الفقرة (5-6-2)

$b_1 = 50 \ , \ n_1 = D/2 = 533.1/2 = 266.6$

- نسبة نحافة الجسد $\lambda = 2.5d/t = 2.5 \text{ x } 46.7 = 117$

الجدول (4-3c)

- باستخدام الجدول (4-3c) مع $\lambda = 117$ و $p_y = 275 \, N/mm^2$

نجد مقاومة الضغط $p_c = 101 \, N \, mm^2$

- تحسب مقاومة الجسد للتحنيب من العلاقة:

العلاقة (5-14)

$$P_w = (b_1 + n_1) t \ p_c$$

$$P_w = (50 + 266.6) \text{ x } 10.2 \text{ x } 101 \text{ x } 10^{-3}$$

$$= 326 \, kN > F_{ve} = 292 \, kN \quad o.k.$$

* تحقيق السهوم:

- يجب أن يتم تحقيق السهوم تحت تأثير أحمال الاستثمار، أي الأحمال الحية غير المصعّدة $w_i = 30 \, kN \, m \ , \ W_i = 50 \, kN$

- بافتراض أن الجائز يحمل إنهاءات يمكن أن تتضرر بالسهوم فيحدد السهم الأعظمي المسموح بالعلاقة التالية:

$$\delta_{\lim} = L/360 = 6.5 \text{ x } 10^3 / 360 = 18.1 \, mm$$

- يحدد السهم الناجم عن حمولات الاستثمار بالعلاقة التالية

$$\delta = \frac{1}{EI}\left[\frac{5\,w_i\,L^4}{384} + \frac{W_i\,L^3}{48}\right]$$

$E = 205\,kN/mm^2$ معامل مرونة الفولاذ

$$\delta = \frac{1}{205 \text{ x } 55400}\left[\frac{5 \text{ x } 30\text{x } 6.5^4}{384} + \frac{50 \text{ x } 6.5^3}{48}\right] \text{x}\, 10^5$$

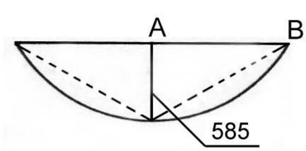
$$\delta = 8.66\,mm < \delta_{\lim} = 18.1\,mm \quad o.k.$$

مثال : (5-2)

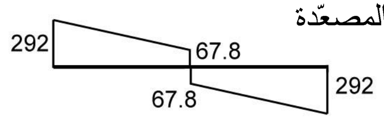
حقق المقطع المختار في المثال (5-1) إذا كان الجائز مقيداً جانبياً تماماً عند المسندين وعند نقطة تطبيق الحمل المركّز فقط.

الحـــــل :

* يبين الشكل أدناه مخططي العزم والقص للجائز الناتجين من الأحمال المصعّدة



مخطط عزم الانعطاف kNm



مخطط القص kN

* تبين في المثال (5-1) أن المقطع مدمج ولا حاجة لتحقيق تحنيب القص وأن $p_y = 275\,N\,mm^2$ و $\varepsilon = 1$
* كما أن المقطع محقق على التأثير المركّب للقص وعزم الانعطاف في منتصف المجاز وفوق المسندين.

* وأن المقطع محقق أيضاً على تحمّل وتحنيب الجسد والسهوم.

* يجب تحقيق الجائز على تحنيب الفتل الجانبي بافتراض أن الطول AB غير مقيد جانبياً.

– بافتراض أن الجائز مقيد جانبياً تماماً عند المسندين وعند نقطة تطبيق الحمل الخارجي وحرّ بالانتقال الجانبي والدوران بين هذه النقاط وأن الحمل مطبق على الجناح العلوي ويمكن أن يكون سبباً في عدم استقرار الجائز فإن الطول الفعّال للجزء المحصور بين AB يحدد كما يلي:

الفقرتين (5-4-4b,c)

$$L_E = (1.2\,L_{AB} + 0.85\,L_{AB})/2$$

$$L_E = (1.2 \text{ x } 3.25 + 0.85 \text{ x } 3.25)/2 = 3.33\,m$$

– نسبة النحافة $\lambda = L_E / r_y = 333/4.51 = 74$

الفقرة (5-5)

– مؤشر الفتل $x = D/T = 533.1/15.6 = 34$

– معامل التحنيب $u = 0.9$

– يحدد معامل النحافة v من الجدول (5-4) بدلالة

$\lambda\ / x = 74/34 = 2.17$

و $N = I_{cf}\ /(I_{cf}\ + I_{lf}\ ) = 0.5$

الجدول (5-4)

فنجد $v = 0.95$

– يحدد معامل تصحيح النحافة n من الجدول (5-5) بافتراض أن القوى المطبقة يمكن أن تساعد في عدم الاستقرار الجانبي.

الجدول (5-5)

فنجد $n = 1$

– إذاً تحدد نسبة النحافة المكافئة λ_{LT} وفق العلاقة التالية:

العلاقة (5-7)

$$\lambda_{LT} = n\,u\,v\,\lambda = 1 \text{ x } 0.9 \text{ x } 0.95 \text{ x } 74 = 63$$

العلاقة (5-6) العلاقة (5-9)	– تحدد مقاومة الانعطاف p_b من الجدول (5-10) بدلالة λ_{LT} و p_y فنجد $p_b = 207\ N/mm^2$ – يحدد العزم المقاوم للتحنيب الجانبي للجائز وفق العلاقة: $M_b = p_b\ S_x = 207 \text{ x } 2370 \text{ x} 10^{-3} = 490\ kN.m$ – يحدد معامل عزم الانعطاف المنتظم المكافئ من الجدول (5-5) فنجد $m = 1.0$ – إن جزء الجائز الواقع بين AB غير آمن ضد تحنيب الفتل الجانبي لأن $\overline{M} = m\,\mathrm{M_A} = 1.0 \text{ x } 585 = 585\ kN.m > M_b$

الفصل السادس

الجوائز الصفائحية

Plate Girders

6 - 1 مقدمـــــة

تستخدم الجوائز الصفائحية كي تغطي مجازات كبيرة وتحمل أحمالاً شاقوليةً ثقيلة لا يمكن حملها بواسطة عناصر مدرفلة على الحامي. لذلك تصنع الجوائز الصفائحية بأبسط أشكالها من صفيحتين للجناحين تلحمان إلى صفيحة الجسد لتشكل مجتمعة مقطعاً على شكل I بحيث يكون العمل الأساسي لصفيحتي الجناحين هو تحمّل قوى ضغط أو شد ناجمة عن عزم الانعطاف. أما صفيحة الجسد فعملها الرئيسي هو تحمّل قوى القص. لتخفيض مساحة الجناحين اللذين يتحملان عزم انعطاف محدد لا بد من زيادة المسافة بينهما، وبالتالي سيزداد ارتفاع صفيحة الجسد مما سيزيد الوزن الذاتي للمقطع. وللمحافظة على الوزن بحدوده الدنيا يجب تخفيض سماكة الجسد كلما زاد ارتفاعه ولهذا يجب أن يدرس تحنيب جسد الجائز الصفائحي بعناية أكبر مما هو معتاد في المقاطع المدرفلة.

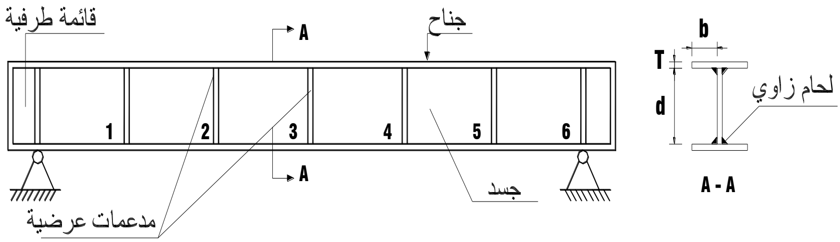
6 - 2 الاختيار الأولي لأبعاد المقطع

يبين الجدول التالي نسبة المجاز إلى ارتفاع مقطع الجائز الموصى بها في الجوائز الصفائحية المستخدمة في الأبنية.

نسبة المجاز إلى الارتفاع	مجـــــال الاســـــتخدام
12 – 20	* جائز ذو استناد بسيط ثابت الارتفاع يحمل بلاطة خرسانية يعمل كجائز مركّب أو غير مركّب.
15 – 20	* جائز مستمر ثابت الارتفاع يحمل بلاطة خرسانية يعمل كجائز غير مركّب.
10 - 15	* جائز حامل للرافعة ذو استناد بسيط.

يجب أن يتم اختيار سماكة صفيحة الجسد بعناية فائقة مع الأخذ بالحسبان عدد وشكل المدعّمات المستخدمة لتدعيم الجسد. فاعتماد سماكة قليلة جداً للجسد سيؤدي إلى زيادة عدد المدعّمات وبالتالي التوفير الزائد في مادة الجسد قد ينعكس سلباً في المادة المطلوب استخدامها في المدعّمات. وفي كل الأحوال تتغير سماكة الجسد بين 10 mm للجوائز ذات العمق حتى 120 cm و 20 mm للجوائز ذات العمق حتى 250 cm.

إن نسبة نحافة صفيحة الجسد d/t التي يصبح عندها الجسد عرضة لتحنيب القص هي ε 63 وفقاً للجدول (2-2) . فعندما تكون $d/t \leq 63\varepsilon$ فلن يحنب الجسد وستكون مبادئ تصميم الجوائز الصفائحية مماثلة لنظيرتها في الجوائز ذات المقاطع المدرفلة. ولكن لأسباب اقتصادية تؤخذ $d/t > 63\varepsilon$ ولهذا لا بد من دراسة تحنيب صفيحة الجسد الناتج عن القص. ويمكن رفع مقاومة الجسد النحيف للتحنيب باستخدام مدعّمات عرضية كما في الشكل (6-1) وقلما تستخدم مدعّمات طولية في حالة الأبنية.



الشكل (6-1) واجهة جائز صفائحي نموذجي

ولمراعاة ظروف الاستثمار كتلك المتعلقة بمنع تحنيب الجسد الناجم عن الحمل والتركيب حدد الكود BS 5950 السماكة الدنيا للجسد وفق الحالات التالية:

* $t \geq d/250$ عندما يكون الجسد غير مدعم.
* $t \geq d/250$ عندما يكون الجسد مدعّماً عرضياً و $a > d$ حيث a التباعد بين المدعّمات
* $t \geq d(a/d)^{1/2}/250$ عندما يكون الجسد مدعّماً عرضياً و $a \leq d$

ولمنع تحنيب الجناح داخلاً في الجسد حدد الكود BS 5950 السماكة الدنيا للجسد وفق الحالات التالية:

* $t \geq (d/250)(p_{yf}/345)$ عندما يكون الجسد غير مدعّم حيث p_{yf} المقاومة التصميمية لفولاذ الجناح.
* $t \geq (d/250)(p_{yf}/345)$ عندما يكون الجسد مدعّماً عرضياً و $a > 1.5\,d$
* $t \geq (d/250)(p_{yf}/445)^{1/2}$ عندما يكون الجسد مدعّماً عرضياً و $a \leq 1.5\,d$

إن تغيير أبعاد الجناحين على طول الجائز لا يجدي نفعاً كثيراً في حالة الأبنية.
ويؤخذ عرض الجناح عادةً في الجوائز غير المركّبة بين % 50 – % 30 من

ارتفاع الجائز، ومن المهم أن يتم اختيار أبعاد صفيحة الجناح بحيث تكون نصف مدمجة على الأقل وذلك لتجنب تحنيب الجناح موضعياً ويمكن تحقيق ذلك بالالتزام بنسبة العرض إلى السماكة المنصوص عليها في الجدول (2-2)، أي $b/T \leq 13\varepsilon$.

قلَّما تُستخدم المدعّمات الطولية في الجوائز الصفائحية في الأبنية وتستخدم المدعّمات العرضية بالقرب من المساند لرفع مقاومة الجائز للقص. وفي كثير من الأحيان لا تستخدم المدعّمات العرضية بعيداً عن المساند نظراً لانخفاض شدة القص. وفي كل الأحوال إن استخدام المدعّمات العرضية يرفع مقاومة الجسد إلى مايزيد عن إجهاد القص الحرج وذلك بسبب نشوء ما يسمى فعل حقل الشد حيث يقوم اللوح (panel) المتشكل بين المدعّمتين والجناحين ببذل مقاومة إضافية للقص وذلك من خلال نشوء إجهادات شادة قطرية. توزع المدعّمات العرضية بحيث تكون النسبة (a/d) لألواح الجسد المتشكلة بين 1.6 – 1.2 وعندما لا يستخدم فعل حقل الشد في تصميم اللوح الطرفي فإن النسبة (a/d) لهذا اللوح تتراوح بين 1.0 – 0.6

3 - 6 تصميم الجوائز الصفائحية Design of plate girders

تتعرض مقاطع الجوائز الصفائحية إلى تراكب في فعل قوى القص وعزوم الانعطاف، ولهذا سمح الكود BS 5950 بتصميمها وفق إحدى الطرق التالية:

1) أن يتم مقاومة عزم الانعطاف بالجناحين فقط وأن يتم مقاومة القص بالجسد.
2) أن يتم مقاومة عزم الانعطاف بالمقطع كاملاً وأن يتم تصميم الجسد ليقاوم الإجهادات القاصّة والناظمية.
3) أن يتم مقاومة جزء من الحمل بالطريقة (1) وأن يتم مقاومة الجزء المتبقي بالطريقة (2).

إن فصل تأثيري العزم والقص كما في الطريقة (1) يؤدي إلى تبسيط كبير وإلى فهم أكبر للآلية التي يقاوم فيها المقطع الأحمال المطبّقة. وعلى الرغم من أن هذه الطريقة محافظة قليلاً لكنها الأكثر تطبيقاً في كثير من الكودات ولذلك سنقوم بشرحها بالتفصيل في الفقرات التالية:

6-3-1 طاقة تحمّل العزم Moment capacity

تحدد طاقة تحمّل العزم الكلّية M_c بالاعتماد على طاقة التحمّل اللدنة لصفيحتي الجناحين وفق العلاقة التالية:

$$M_c = p_{yf}\ S_{xf} \qquad (6\text{-}1)$$

حيث p_{yf} المقاومة التصميمية لصفيحة الجناح وتحدد من الجدول (1-2).

S_{xf} معامل المقطع اللدن للجناحين فقط حول محور المقطع.

6-3-2 طاقة تحمّل القص Shear capacity

على فرض أن جسد المقطع سيقام فقط قوى قاصة فيمكن تصميم الألواح الداخلية (panels) باستخدام فكرة حقل الشد ومن ثم تصميم الألواح الطرفية طبقاً لذلك، أو تصميم الألواح الداخلية والطرفية بشكل محافظ بتجاهل فكرة حقل الشد.

6-3-2-1 التصميم بدون استخدام فعل حقل الشد

Design without using tension field action

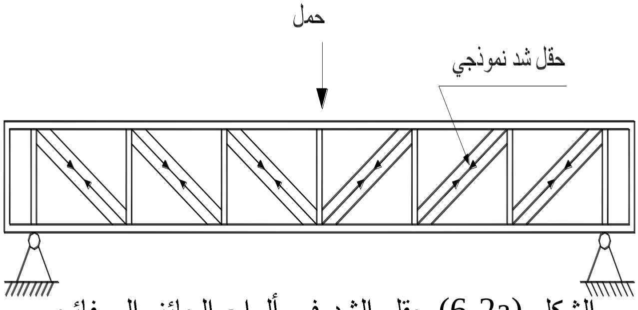
تُستخدم هذه الطريقة في تصميم الجوائز غير المدعّمة وتُستخدم أيضاً بشكل محافظ في تصميم الألواح الداخلية والطرفية من جسد جائز مدعّم عرضياً فتحدد مقاومة لوح لتحنيب القص بالعلاقة التالية:

$$V_{cr} = q_{cr}\ \mathrm{dt} \qquad (6\text{-}2)$$

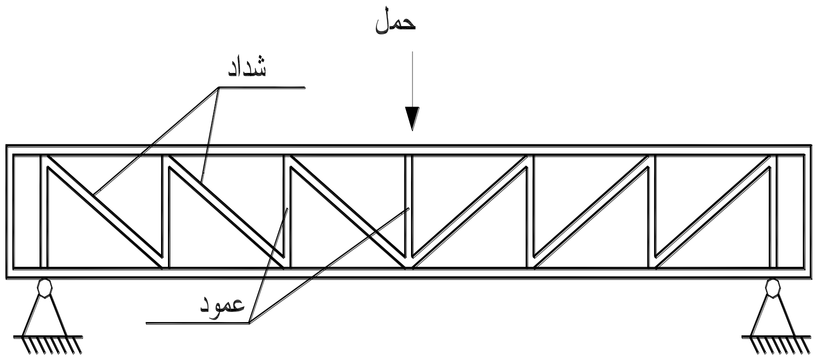
حيث q_{cr} مقاومة القص الحرج. وتحدد من الجداول (6-1a-d) وذلك بالاعتماد على نسبة بعدي اللوح a/d وعلى نسبة نحافة الجسد d/t. تؤخذ a/d مساوية إلى اللانهاية عندما يكون الجسد غير مدعّم.
$t,\ d,\ a$ هي طول اللوح وارتفاع وسماكة الجسد على الترتيب.

6-3-2-2 التصميم باستخدام فعل حقل الشد Design using tension field action

تزداد طاقة تحمّل القص باستخدام المدعّمات العرضية لأنه q_{cr} تزداد مع نقصان النسبة a/d كما هو واضح من الجداول (6-1a-d) ولأنه يتم الاستفادة من طاقة تحمّل اللوح بعد الوصول إلى مرحلة التحنيب الحرجة، ولهذا مكّن استخدام المدعّمات العرضية الجائز من تحمّل قوى أعلى بكثير من مقاومته محسوبة طبقاً لنظريات تحنيب القص المرن وذلك بسبب نشوء فعل حقل الشد (tension field). وما إن يحنّب لوح من جسد جائز صفائحي حتى تهمل طاقة تحمّله لأية إجهادات ضغط قطرية إضافية ويعتبر عندها أن ميكانيكية جديدة لتحمّل القوى قد نشأت حيث يتم مقاومة أي قص إضافي بحقل إجهادات شادة غشائية مائلة كما هو مبين في الشكل (6-2a). وتصبح الطريقة التي يقاوم بها الجائز الصفائحي القوى الخارجية مشابهة لعمل جائز شبكي على شكل حرف (N) كما في الشكل (6-2b) حيث تشبه المقاومة التي تقوم بها صفائح الجسد فعل قضبان الشد القطرية في الجائز الشبكي.

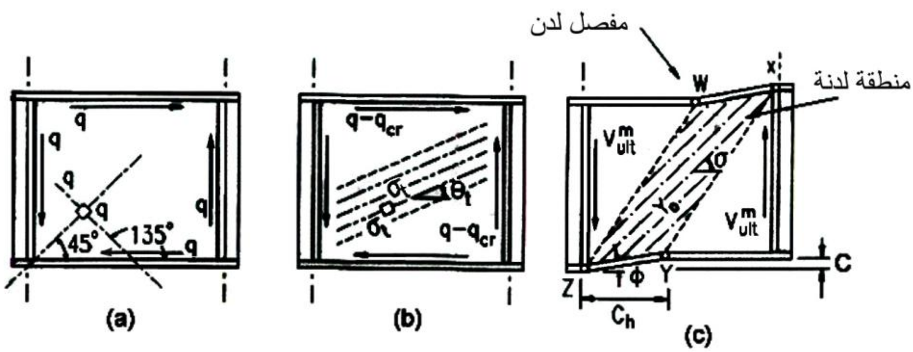


الشكل (6-2a) حقل الشد في ألواح الجائز الصفائحي



الشكل (6-2b) جائز شبكي على شكل (N)

بناءً على ما تقدم يمكن تقسيم تصرف الجائز الصفائحي مع ازدياد قوى القص إلى مراحل ثلاثة مبينة في الشكل (6-3).



الشكل (6-3) مراحل تصرف لوح نموذجي تحت تأثير القص حتى الانهيار

* المرحلة الأولى:

كما في الشكل (6-3a) حيث لم يصل الجائز بعدُ إلى مرحلة التحنيب فيتعرض اللوح إلى إجهادات ضغط وشد رئيسية متساوية.

* المرحلة الثانية:

كما في الشكل (6-3b) حيث نشأ حقل شد في مرحلة ما بعد التحنيب.

* المرحلة الثالثة:

كما في الشكل (6-3c) حيث تبين وضعية الانهيار التي تحدث عندما يصل الجسد إلى مرحلة السيلان ويتشكل أربعة مفاصل لدنة في الجناحين مؤدية إلى حدوث ميكانيكية انهيار (sway collaps mechanism)

تُحدد مقاومة لوح لتحنيب القص بالعلاقة التالية:

$$V_b = \left(q_b + q_f \sqrt{K_f}\right) dt \leq 0.6\, p_y \, \mathrm{dt} \qquad (6\text{-}3)$$

حيث q_b يمثل مقاومة القص الأساسية. وهي تشمل مقاومة القص الحرج q_{cr} ومقاومة الجسد في مرحلة ما بعد التحنيب الناتجة عن حقل الشد المثبت بالمدعّمات العرضية. تُحدَّد قيمة q_b من الجداول (6-2a-d) بدلالة النسبتين (a/d) و (d/t)

q_f معامل مقاومة القص المعتمدة على الجناحين ويحدد من الجداول (6-3a-d) بدلالة النسبتين (a/d) و (d/t)

K_f يعطى بالعلاقة التالية:

$$K_f = M_{pf}\left(1 - f / p_{yf}\right)/4\, M_{pw} \qquad (6\text{-}4)$$

حيث M_{pf} العزم اللدن الذي تتحمله الجناح الصغرى حول محور مارّ في مركز ثقلها وموازٍ للجناح نفسه ويعطى بالعلاقة:

$$M_{pf} = 2bT^2\, p_{yf} / 4 \qquad (6\text{-}5)$$

M_{pw} العزم اللدن الذي يتحمله الجسد حول محور مارّ في مركز ثقله وعمودي عليه ويعطى بالعلاقة التالية:

$$M_{pw} = td^2 p_{yw} / 4 \qquad (6\text{-}6)$$

p_{yw} , p_{yf} المقاومة التصميمية للجناح وللجسد على الترتيب.

f متوسط الإجهادات الطولية في الجناح الصغرى نتيجة لعزم الانعطاف.

فعندما تكون الإجهادات الطولية في الجناح قريبة من P_{yf} فإن K_f تكون صغيرة وبالتالي ستكون مساهمة الجناح في مقاومة القص صغيرة.

يجب الانتباه إلى أن حقل الشد في لوح ما لا ينشأ إلا إذا توفر إرساء له من قبل العناصر المحددة للوح، وهذا يوضح المشكلة التي تطرأ عادة في اللوح الطرفي من الجائز حيث يجب أن تؤمّن المدعّمة الطرفية بمفردها هذا الإرساء. يقترح الكود BS 5950 أن تُحسب القوة الناتجة عن إرساء حقل الشد بالعلاقة التالية:

$$H_q = 0.75\, dt\ p_y \left(1 - q_{cr} / 0.6 p_y\right)^{1/2} \quad (6\text{-}7)$$

وبناءً على ذلك يسمح الكود أن يصمم اللوح الطرفي بإحدى الطريقتين التاليتين:

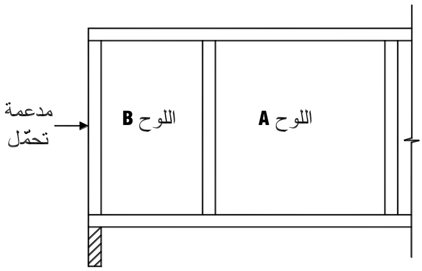
1) أن يحسب اللوح الطرفي دون الاستفادة من فعل حقل الشد فيه والاكتفاء بتحديد مقاومته لتحنيب القص V_{cr} وفقاً للفقرة (1 -2 -4 -6) وعندها يجب تحقيق جملة اللوح الطرفي B مع المدعّمتين العرضيتين المحددتين له وكأنها مجتمعة تشكل جائزاً يمتد بين الجناحين ويستند عليهما ويتحمل قصاً R_{tf} وعزم انعطاف M_{tf} ناجمين عن قوة السحب H_q الناتجة عن حقل الشد في اللوح A المبين في الشكل (6-4). يحدد القص والعزم المذكوران بالعلاقتين التاليتين:

$$R_{tf} = 0.5\, H_q \qquad (6\text{-}8)$$

$$M_{tf} = H_q\, d / 10 \qquad (6\text{-}9)$$

كما يجب أن تكون المدعّمة الطرفية قادرة على تحمّل رد فعل الجائز إضافة لقوة الضغط الناتجة عن العزم M_{tf}

- يصمم اللوح A باستخدام فعل حقل الشد
- يصمم اللوح B بدون استخدام فعل حقل الشد
- تصمم مدعمة التحمّل على قوة ضغط مساوية لرد الفعل + قوة الضغط الناتجة عن العزم M_{tf}



الشكل (4-6) تصميم اللوح الطرفي دون استخدام فعل حقل الشد

تعتبر هذه الطريقة محافظة وتنتج عناصر طرفية كبيرة لأنها لم توظف طاقة القص الإضافية للوح B الناتجة عن فعل حقل الشد في حين أن قوة القص المطبقة كبيرة لقرب اللوح من المسند. ولمنع الحصول على طاقة تحمّل قص في اللوح الطرفي B أصغر بكثير من طاقة اللوح A المجاور فيتم اختيار عرض أصغر للوح B.

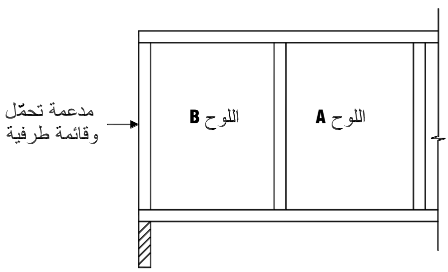
2) أن يتم حساب اللوح الطرفي بالاستفادة من فعل حقل الشد أي يصمم هذا اللوح وفقاً للفقرة (2 -2 -4 -6) مع ضرورة تزويد الجائز بقائمة طرفية تتألف إما من مدعّمة واحدة أو اثنتين كما هو مبين في الشكلين (5,6 -6) على أن تحقق هذه القائمة ما يلي:

– عندما تتكون القائمة من مدعّمة واحدة:

يجب أن يتم وصل الطرف العلوي للقائمة بشكل صلب بالجناح بواسطة اللحام. ويجب أن تكون القائمة قادرة على تحمّل رد الفعل مضافاً إليه عزماً قدره $2M_{tf}/3$ ناتجاً عن قوى تثبيت حقل الشد في اللوحة B حيث تحدد M_{tf} بالعلاقة (9 -6).

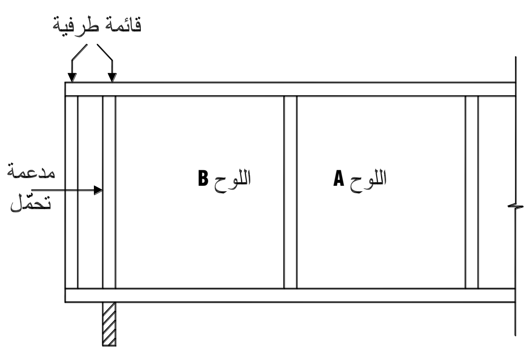
– عندما تتكون القائمة من مدعّمتين:

عندها يجب أن تُحسب المدعّمتان مع جزء الجسد المحصور بينهما وكأنها تشكل مجتمعة جائزاً يمتد بين الجناحين ويستند عليهما بحيث يكون هذا الجائز قادراً على تحمّل قص قدره R_{tf} وعزم انعطاف قدره M_{tf} ناتجين عن حقل الشد في اللوح B.



- يصمم اللوحين A,B باستخدام فعل حقل الشد
- تصمم مدعمة التحمّل على قوة ضغط مساوية لرد الفعل وعزم يساوي $^{2}/_{3}$ M_{tf}

الشكل (6-5) تصميم اللوح الطرفي باستخدام فعل حقل الشد (مدعمة واحدة)



- يصمم اللوحين A,B باستخدام فعل حقل الشد
- تصمم مدعمة التحمّل على قوة ضغط مساوية لرد الفعل
- تصمم القائمة الطرفية على قوة قص افقية مساوية R_{tf} وعزم M_{tf}

الشكل (6-6) تصميم اللوح الطرفي باستخدام فعل حقل الشد (مدعمة مزدوجة)

في الألواح التي تصمم بالاستفادة من فعل حقل الشد , يجب ضرب قوة إرساء حقل الشد H_q بالعامل $(f_v - q_{cr})/(q_b - q_{cr})$ وذلك عندما $f_v < q_b$

حيـــث f_v , q_{cr} , q_b تمثل مقاومة القص الأساسية ومقاومة القص الحرج والإجهادات القاصة المطبّقة على اللوح المدروس على الترتيب.

6 - 4   تصميم المدعّمات Design of stiffeners

إذا بينت التحقيقات أن جسد المقطع بمفرده غير كافٍ، يجب استخدام المدعّمة المناسبة لمنع حدوث أي من الحالات التالية:

* تحنيب الجسد موضعياً نتيجة الأحمال المركّزة.
* تحطم الجسد موضعياً نتيجة الأحمال المركّزة.
* تحنيب الجسد النحيف الناتج عن القص.

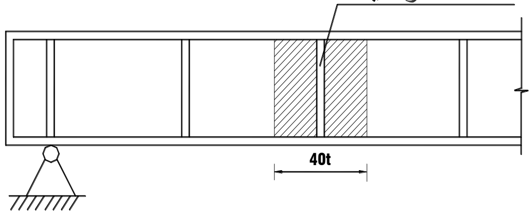
وعليه تقسم المدعّمات الرئيسية العرضية إلى ثلاثة أقسام هي:

6-4-1   مدعّمات لحمل القوى المطبّقة Load – carrying stiffeners

يستخدم هذا النوع من المدعّمات لمنع تحنيب الجسد موضعياً تحت تأثير الأحمال المركّزة أو ردود الأفعال المطبّقة عبر الجناح، ويوصي الكود باستخدام مدعّمات عرضية عندما تكون مقاومة الجسد بمفرده للتحنيب الموضعي غير كافية. وتحسب مقاومة الجسد للتحنيب الموضعي وفقاً للفقرة (2-6-5). ويجب تحقيق المدعّمة كأي عنصر مضغوط على التحنيب وعلى التحمّل.

* عند تحقيق المدعّمة على التحنيب يؤخذ عرض فعّال من الجسد بطول 20t على طرفي محور المدعّمة ليعمل مع المدعّمة كمقطع مشترك مضغوط كما في الشكل (6-7) وعندها يحسب نصف قطر العطالة حول محور موازٍ للجسد. ويؤخذ الطول الفعّال لهذا العنصر المضغوط مساوياً % 70 من طول المدعّمة الحقيقي عندما يكون الجناح ممنوعاً من الدوران في مستوي المدعّمة. وإذا لم يكن الجناح ممنوعاً تماماً من الدوران فيؤخذ الطول الفعّال مساوياً

للطول الحقيقي وتستخرج مقاومة الضغط p_c من الجدول (4-3c) بدلالة نسبة النحافة والمقاومة التصميمية المستخرجة من الجدول (2-1) للجسد أو للمدعّمة أيهما أصغر. يجب أن يكون الحمل المطبّق F_x على المدعّمة أقل من طاقة التحمل على التحنيب P_x



الشكل (6-7) جزء الجسد الذي يعمل مع المدعمة

* عند تحقيق المدعّمة على التحمّل يجب أن تحقق مساحة المدعّمة A الماسّة مباشرةً للجناح العلاقة التالية:

$$A > 0.8F_x / p_{ys} \qquad (6\text{-}10)$$

حيث F_x الحمل الخارجي أو رد الفعل.

p_{ys} المقاومة التصميمية للمدعّمة وفق الجدول (2-1).

6-4-2 مدعّمات تحمّل Bearing stiffeners

يستخدم هذا النوع من المدعّمات لمنع تحطم الجسد موضعياً تحت تأثير الأحمال المركّزة أو ردود الأفعال المطبّقة عبر الجناح، ويوصي الكود باستخدام مدعّمات عرضية عندما تكون مقاومة الجسد بمفرده للانسحاق الموضعي غير كافية وتحسب مقاومة الجسد للتحمّل الموضعي وفقاً للفقرة (5-6-1).

يجب تصميم المدعّمة لتتحمل القوى المطبّقة مطروحاً منها قوة تحمّل الجسد محسوبة وفق العلاقة (5-13).

6-4-3 المدعّمات العرضية الوسطية Intermediate transverse stiffeners

تستخدم المدعّمات العرضية الوسطية لرفع كفاءة الجسد لمقاومة التحنيب الناجم عن القص، وتحدد مواقع هذه المدعّمات والمسافة بينها وفقاً لذلك وبشكل أولي توزع وفقاً للفقرة (6-2). وقد أوصى الكود أن لا يزيد عرض المدعّمة عن $19\, t_s \varepsilon$ وأن لا يزيد العرض المستخدم في الحساب عن $13\, t_s \varepsilon$ وعندما تكون غير معرضة لحمل أو عزم خارجي يجب أن لا يقل عزم عطالتها I_s حول محور الجسد عن:

$$a \geq d\sqrt{2} \quad \text{عندما} \quad I_s \geq 0.5\, d t^3 \qquad (6\text{-}11)$$

$$a < d\sqrt{2} \quad \text{عندما} \quad I_s \geq 1.5\, d^3 t^3 / a^2 \qquad (6\text{-}12)$$

حيث d و t ارتفاع وسماكة الجناح.

a المسافة بين المدعّمات، t_s سماكة المدعّمة.

$\varepsilon = \left(275 / p_y\right)^{1/2}$ ، p_y المقاومة التصميمية للمدعّمة.

وعندما تكون المدعّمة معرّضة لقوى جانبية أو عزوم ناتجة عن أحمال عرضية بالنسبة للجسد، يجب زيادة عزم عطالتها المبين سابقاً بـــ :

* $2\, FD^3/Et$ في حالة القوى الجانبية.

* $M_s\, D^2/Et$ في حالة العزوم.

حيث : D ارتفاع المقطع الكلي، E معامل المرونة.

F القوة الجانبية المصعّدة المطبّقة على الجناح المضغوط التي يجب مقاومتها بالمدعّمة.

M_s العزم المطبّق على المدعّمة الناتج عن الأحمال غير المركزية.

يجب تحقيق تحنيب المدعّمة كما يلي:

(1) المدعّمات غير المعرضة لأحمال أو عزوم خارجية.

يجب أن لا تتجاوز القوة F_q المطبّقة على المدعّمة القوة التي تؤدي إلى تحنيبها P_q أي:

$$F_q = V - V_s \le P_q \qquad (6\text{-}13)$$

حيث V قوة القص الأعظمية عند المدعّمة.

V_s مقاومة اللوح المجاور للمدعّمة لتحنيب القص دون استخدام فعل حقل الشد. أي قوة القص الحرج V_{cr} في أي من اللوحين المجاورين للمدعّمة أيهما أصغر.

P_q طاقة تحمّل المدعّمة الوسطية على التحنيب وتُحدَّد باعتبار طول التحنيب مساوياً 70% من طولها الفعلي.

(2) المدعّمات المعرضة لأحمال أو عزوم خارجية :

يجب أن تحقق شروط المدعّمات الحاملة لقوى خارجية المنصوص عليها في الفقرة (1 -4 -6) إضافة إلى علاقة الترابط التالية:

$$\frac{F_q - F_x}{P_q} + \frac{F_x}{P_x} + \frac{M_s}{M_{ys}} \le 1 \qquad (6\text{-}14)$$

حيث P_x طاقة تحمّل المدعّمة على اعتبار أنها ستقوم بحمل قوى خارجية

M_s العزم المطبّق على المدعّمة الناتج عن الأحمال الخارجية غير المركزية.

M_{ys} طاقة تحمّل المدعّمة للعزوم بناءً على العزم المقاوم المرن لمقطعها.

6 - 5 اتصال المدعّمات الوسطية بجسد المقطع

عندما لا تكون المدعّمة الوسطية معرّضة إلى قوى خارجية فيجب أن يتحمّل اللحام بين أي من صفيحتي المدعّمة والجسد قوة قاصة مقدّرة بـــ kN/mm من طول

اللحام لا تقل عن $t^2/5b_s$ حيث t سماكة الجسد مقدّرة بـــ mm و b_s بروز المدعّمة (عرضها) مقدراً بـــ mm .

أما عندما تكون المدعّمة الوسطية خاضعة لقوة خارجية فيجب إضافة القص الناتج عنها إلى القيمة السابقة.

6 - 6 تحقيق الجسد بين المدعّمات

يجب أن لا يزيد إجهاد الضغط (f_{ed}) الناتج عن الأحمال الخارجية أو ردود الأفعال المطبّقة مباشرةً عبر الجناح وصولاً إلى طرف الجسد عن مقاومة الضغط P_{ed}

حيث يحسب f_{ed} بقسمة الأحمال المركّزة على البعد الصغير للوح، ويضاف إلى ذلك أي حمل موزّع بانتظام. ويقسم الناتج على سماكة اللوح.

و تحسب p_{ed} وفق إحدى العلاقتين التاليتين:

$$p_{ed} = \left[2.75 + \frac{2}{(a/d)^2}\right]\frac{E}{(d/t)^2} \qquad (6\text{-}15)$$

عندما تكون الجناح المضغوطة ممنوعة من الدوران بالنسبة للجسد.

أو

$$p_{ed} = \left[1.0 + \frac{2}{(a/d)^2}\right]\frac{E}{(d/t)^2} \qquad (6\text{-}16)$$

عندما تكون الجناح المضغوطة غير ممنوعة تماماً من الدوران بالنسبة للجسد.

Critical shear strength, q_{cr} (in N/mm^2) الجدول (6-1a) مقاومة القص الحرج

(a) Grade 43 steel (p_y = 265 N/mm^2)

d/t	Stiffener spacing ratio a/d														
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	∞
55	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159
60	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159
65	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	157
70	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	158	155	153	148
75	159	159	159	159	159	159	159	159	158	155	152	150	147	145	140
80	159	159	159	159	159	159	159	157	152	148	145	143	140	137	132
85	159	159	159	159	159	159	158	150	145	141	138	136	132	130	124
90	159	159	159	159	159	158	152	144	138	134	131	128	124	122	116
95	159	159	159	159	159	153	146	137	131	127	123	121	117	114	108
100	159	159	159	159	155	147	140	131	124	120	116	114	109	107	100
105	159	159	159	159	150	141	133	124	118	113	109	106	102	98	91
110	159	159	159	155	145	136	127	118	111	106	102	98	93	90	83
115	159	159	159	150	139	130	121	111	104	98	93	90	85	82	76
120	159	159	158	146	134	124	115	105	96	90	86	82	78	75	69
125	159	159	154	141	129	118	109	97	88	83	79	76	72	69	64
130	159	159	150	136	124	113	103	90	82	77	73	70	66	64	59
135	159	159	145	131	118	107	96	83	76	71	68	65	61	59	55
140	159	158	141	126	113	101	89	78	71	66	63	61	57	55	51
145	159	154	137	122	108	94	83	72	66	61	59	56	53	52	48
150	159	150	133	117	103	88	78	68	61	57	55	53	50	48	44
155	159	147	128	112	96	83	73	63	58	54	51	49	47	45	42
160	159	143	124	107	90	78	68	59	54	51	48	46	44	42	39
165	159	139	120	102	85	73	64	56	51	47	45	44	41	40	37
170	158	136	116	97	80	69	61	53	48	45	43	41	39	37	35
175	155	132	111	91	76	65	57	50	45	42	40	39	37	35	33
180	152	128	107	86	71	61	54	47	43	40	38	37	35	33	31
185	149	125	103	82	68	58	51	44	40	38	36	35	33	32	29
190	146	121	98	77	64	55	48	42	38	36	34	33	31	30	28
195	143	117	93	73	61	52	46	40	36	34	32	31	29	28	26
200	140	114	88	70	58	50	44	38	35	32	31	30	28	27	25
205	136	110	84	66	55	47	42	36	33	31	29	28	27	26	24
210	133	106	80	63	52	45	40	34	31	29	28	27	25	25	23
215	130	103	76	60	50	43	38	33	30	28	27	26	24	23	22
220	127	98	73	58	48	41	36	31	29	27	25	25	23	22	21
225	124	94	70	55	46	39	35	30	27	26	24	23	22	21	20
230	121	90	67	53	44	38	33	29	26	24	23	22	21	20	19
235	118	86	64	51	42	36	32	28	25	23	22	22	20	20	18
240	115	82	61	48	40	34	30	26	24	22	21	21	19	19	17
245	112	79	59	46	39	33	29	25	23	22	21	20	19	18	17
250	109	76	56	45	37	32	28	24	22	21	20	19	18	17	16

Critical shear strength, q_{cr} (in N/mm^2) الجدول (6-1b) مقاومة القص الحرج

(b) Grade 43 steel (p_y = 275 N/mm^2)

	Stiffener spacing ratio a/d														
d/t	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	∞
55	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165
60	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165
65	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	160
70	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	164	162	158	157	152
75	165	165	165	165	165	165	165	165	162	159	156	154	150	148	143
80	165	165	165	165	165	165	165	161	155	151	148	146	142	140	135
85	165	165	165	165	165	165	162	154	148	144	141	138	134	132	126
90	165	165	165	165	165	162	155	147	141	136	133	131	126	124	118
95	165	165	165	165	165	156	149	140	134	129	125	123	118	116	110
100	165	165	165	165	159	150	142	133	126	121	118	115	110	108	100
105	165	165	165	164	154	144	136	126	119	114	110	107	102	98	91
110	165	165	165	159	148	138	130	119	112	107	102	98	93	90	83
115	165	165	165	154	142	132	123	112	105	98	93	90	85	82	76
120	165	165	162	149	137	126	117	106	96	90	86	82	78	75	69
125	165	165	158	144	131	120	110	97	88	83	79	76	72	69	64
130	165	165	153	139	126	114	104	90	82	77	73	70	66	64	59
135	165	165	149	134	120	108	96	83	76	71	68	65	61	59	55
140	165	162	144	129	114	101	89	78	71	66	63	61	57	55	51
145	165	158	140	123	109	94	83	72	66	61	59	56	53	52	48
150	165	154	135	118	103	88	78	68	61	57	55	53	50	48	44
155	165	150	131	113	96	83	73	63	58	54	51	49	47	45	42
160	165	146	126	108	90	78	68	59	54	51	48	46	44	42	39
165	165	142	122	103	85	73	64	56	51	47	45	44	41	40	37
170	162	138	117	97	80	69	61	53	48	45	43	41	39	37	35
175	158	134	113	91	76	65	57	50	45	42	40	39	37	35	33
180	155	131	108	86	71	61	54	47	43	40	38	37	35	33	31
185	152	127	103	82	68	58	51	44	40	38	36	35	33	32	29
190	149	123	98	77	64	55	48	42	38	36	34	33	31	30	28
195	146	119	93	73	61	52	46	40	36	34	32	31	29	28	26
200	142	115	88	70	58	50	44	38	35	32	31	30	28	27	25
205	139	111	84	66	55	47	42	36	33	31	29	28	27	26	24
210	136	107	80	63	52	45	40	34	31	29	28	27	25	25	23
215	133	103	76	60	50	43	38	33	30	28	27	26	24	23	22
220	130	98	73	58	48	41	36	31	29	27	25	25	23	22	21
225	126	94	70	55	46	39	35	30	27	26	24	23	22	21	20
230	123	90	67	53	44	38	33	29	26	24	23	22	21	20	19
235	120	86	64	51	42	36	32	28	25	23	22	22	20	20	18
240	117	82	61	48	40	34	30	26	24	22	21	21	19	18	17
245	114	79	59	46	39	33	29	25	23	22	21	20	19	18	17
250	110	76	56	45	37	32	28	24	22	21	20	19	18	17	16

الجدول (6-1c) مقاومة القص الحرج

(c) Grade 50 steel (p_y = 340 N/mm^2)

d/t	Stiffener spacing ratio a/d														
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	∞
55	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204
60	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	202	195
65	204	204	204	204	204	204	204	204	204	201	198	196	191	189	183
70	204	204	204	204	204	204	204	202	196	191	188	185	180	178	171
75	204	204	204	204	204	204	202	193	186	181	177	174	169	167	160
80	204	204	204	204	204	202	194	183	176	171	167	163	158	155	148
85	204	204	204	204	204	194	185	174	166	160	156	153	147	144	136
90	204	204	204	204	197	186	176	164	156	150	146	142	136	133	123
95	204	204	204	202	189	177	167	155	146	140	135	131	124	120	111
100	204	204	204	195	181	169	158	146	136	129	123	119	112	108	100
105	204	204	204	188	174	161	150	136	125	117	112	108	102	98	91
110	204	204	198	181	166	153	141	126	114	107	102	98	93	90	83
115	204	204	192	174	158	144	132	115	105	98	93	90	85	82	76
120	204	204	186	167	151	136	122	106	96	90	86	82	78	75	69
125	204	201	179	160	143	127	112	97	88	83	79	76	72	69	64
130	204	196	173	153	135	117	104	90	82	77	73	70	66	64	59
135	204	190	167	146	127	109	96	83	76	71	68	65	61	59	55
140	204	185	161	139	118	101	89	78	71	66	63	61	57	55	51
145	204	179	155	132	110	94	83	72	66	61	59	56	53	52	48
150	202	174	148	124	103	88	78	68	61	57	55	53	50	48	44
155	198	169	142	116	96	83	73	63	58	54	51	49	47	45	42
160	194	163	136	109	90	78	68	59	54	51	48	46	44	42	39
165	189	158	130	103	85	73	64	56	51	47	45	44	41	40	37
170	185	153	122	97	80	69	61	53	48	45	43	41	39	37	35
175	180	147	115	91	76	65	57	50	45	42	40	39	37	35	33
180	176	142	109	86	71	61	54	47	43	40	38	37	35	33	31
185	172	137	103	82	68	58	51	44	40	38	36	35	33	32	29
190	167	131	98	77	64	55	48	42	38	36	34	33	31	30	28
195	163	125	93	73	61	52	46	40	36	34	32	31	29	28	26
200	158	119	88	70	58	50	44	38	35	32	31	30	28	27	25
205	154	113	84	66	55	47	42	36	33	31	29	28	27	26	24
210	150	108	80	63	52	45	40	34	31	29	28	27	25	25	23
215	145	103	76	60	50	43	38	33	30	28	27	26	24	23	22
220	141	98	73	58	48	41	36	31	29	27	25	25	23	22	21
225	136	94	70	55	46	39	35	30	27	26	24	23	22	21	20
230	132	90	67	53	44	38	33	29	26	24	23	22	21	20	19
235	127	86	64	51	42	36	32	28	25	23	22	22	20	20	18
240	122	82	61	48	40	34	30	26	24	22	21	21	19	19	17
245	117	79	59	46	39	33	29	25	23	22	21	20	19	18	17
250	112	76	56	45	37	32	28	24	22	21	20	19	18	17	16

Critical shear strength, q_{cr} (in N/mm^2) الجدول (6-1d) مقاومة القص الحرج

(d) Grade 50 steel (p_y = 355 N/mm^2)

	Stiffener spacing ratio														
d/t	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	
55	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213
60	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	212	208	206	200
65	213	213	213	213	213	213	213	213	212	207	204	201	197	194	188
70	213	213	213	213	213	213	213	208	201	196	192	190	185	182	175
75	213	213	213	213	213	213	208	198	191	185	181	178	173	170	163
80	213	213	213	213	213	208	199	188	180	174	170	167	161	158	150
85	213	213	213	213	210	199	190	178	170	163	159	155	150	146	138
90	213	213	213	213	202	190	180	168	159	152	148	144	138	134	123
95	213	213	213	208	194	182	171	158	148	142	136	132	124	120	111
100	213	213	213	200	186	173	161	148	138	129	123	119	112	108	100
105	213	213	210	193	178	164	152	138	125	117	112	108	102	98	91
110	213	213	204	186	169	155	143	126	114	107	102	98	93	90	83
115	213	213	197	178	161	146	132	115	105	98	93	90	85	82	76
120	213	212	190	171	153	137	122	106	96	90	86	82	78	75	69
125	213	207	184	163	145	127	112	97	88	83	79	76	72	69	64
130	213	201	177	156	137	117	104	90	82	77	73	70	66	64	59
135	213	195	171	148	127	109	96	83	76	71	68	65	61	59	55
140	213	190	164	141	118	101	89	78	71	66	63	61	57	55	51
145	213	184	157	133	110	94	83	72	66	61	59	56	53	52	48
150	208	178	151	124	103	88	78	68	61	57	55	53	50	48	44
155	204	172	144	116	96	83	73	63	58	54	51	49	47	45	42
160	199	167	137	109	90	78	68	59	54	51	48	46	44	42	39
165	194	161	130	103	85	73	64	56	51	47	45	44	41	40	37
170	190	155	122	97	80	69	61	53	48	45	43	41	39	37	35
175	185	150	115	91	76	65	57	50	45	42	40	39	37	35	33
180	180	144	109	86	71	61	54	47	43	40	38	37	35	33	31
185	175	138	103	82	68	58	51	44	40	38	36	35	33	32	29
190	171	132	98	77	64	55	48	42	38	36	34	33	31	30	28
195	166	125	93	73	61	52	46	40	36	34	32	31	29	28	26
200	161	119	88	70	58	50	44	38	35	32	31	30	28	27	25
205	157	113	84	66	55	47	42	36	33	31	29	28	27	26	24
210	152	108	80	63	52	45	40	34	31	29	28	27	25	25	23
215	147	103	76	60	50	43	38	33	30	28	27	26	24	23	22
220	143	98	73	58	48	41	36	31	29	27	25	25	23	22	21
225	138	94	70	55	46	39	35	30	27	26	24	23	22	21	20
230	132	90	67	53	44	38	33	29	26	24	23	22	21	20	19
235	127	86	64	51	42	36	32	28	25	23	22	22	20	20	18
240	122	82	61	48	40	34	30	26	24	22	21	21	19	19	17
245	117	79	59	46	39	33	29	25	23	22	21	20	19	18	17
250	112	76	56	45	37	32	28	24	22	21	20	19	18	17	16

Basic shear strength, q_b (in N/mm²) الجدول (6-2a) مقاومة القص الأساسية

(a) Grade 43 steel (p_y = 265 N/mm²)

	Stiffener spacing ratio a/d													
d/t	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0
55	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159
60	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159
65	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159
70	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159
75	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	150	148
80	159	159	159	159	159	159	159	159	159	151	149	148	145	143
85	159	159	159	159	159	159	159	159	149	147	145	143	140	137
90	159	159	159	159	159	159	159	149	145	142	140	138	134	131
95	159	159	159	159	159	159	150	145	141	138	135	133	128	125
100	159	159	159	159	159	150	147	142	137	133	130	127	122	119
105	159	159	159	159	159	148	144	138	133	129	125	122	116	111
110	159	159	159	159	150	145	141	134	128	124	120	116	109	104
115	159	159	159	159	147	142	137	130	124	118	113	109	102	97
120	159	159	159	159	145	140	134	126	118	112	107	103	96	91
125	159	159	159	148	143	137	131	121	113	107	102	98	91	86
130	159	159	159	146	140	133	127	116	108	102	97	93	86	81
135	159	159	150	144	137	130	123	112	104	97	93	89	82	77
140	159	159	149	142	135	127	118	108	100	94	89	85	78	73
145	159	159	147	140	132	123	114	104	96	90	85	81	75	70
150	159	159	145	138	129	119	111	100	93	87	82	78	71	67
155	159	151	144	135	126	116	108	97	90	84	79	75	69	64
160	159	150	142	133	122	113	105	94	87	81	76	73	66	61
165	159	149	140	130	119	110	102	92	84	79	74	70	64	59
170	159	147	138	127	116	107	99	89	82	76	72	68	61	57
175	159	146	136	125	114	105	97	87	80	74	70	66	59	55
180	159	145	134	122	111	102	95	85	78	72	68	64	58	53
185	159	143	132	119	109	100	93	83	76	71	66	63	56	52
190	151	142	130	117	107	98	91	82	74	69	65	61	54	50
195	150	140	128	115	105	96	89	80	73	67	63	59	53	49
200	149	139	125	113	103	94	88	78	71	66	62	58	52	47
205	148	137	123	111	101	93	86	77	70	65	60	57	50	46
210	147	136	121	109	99	91	85	76	69	63	59	56	49	45
215	146	134	119	107	98	90	83	74	68	62	58	55	48	44
220	145	132	117	106	96	89	82	73	66	61	57	54	47	43
225	144	130	116	104	95	87	81	72	65	60	56	53	46	42
230	143	129	114	103	94	86	80	71	64	59	55	52	45	41
235	142	127	113	101	92	85	79	70	64	58	54	51	45	40
240	141	125	111	100	91	84	78	69	63	58	53	50	44	39
245	140	124	110	99	90	83	77	68	62	57	53	49	43	39
250	139	122	109	98	89	82	76	68	61	56	52	49	42	38

الجدول (6-2b) مقامة القص الأساسية

(b) Grade 43 steel (p_y = 275 N/mm^2)

d/t	Stiffener spacing ratio a/d													
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0
55	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165
60	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165
65	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165
70	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165
75	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	156	154	152
80	165	165	165	165	165	165	165	165	165	155	153	152	149	147
85	165	165	165	165	165	165	165	156	153	151	149	147	143	140
90	165	165	165	165	165	165	165	153	149	146	144	141	137	134
95	165	165	165	165	165	165	154	149	145	142	138	136	131	127
100	165	165	165	165	165	155	151	146	141	137	133	130	124	120
105	165	165	165	165	157	152	148	142	136	131	127	124	117	112
110	165	165	165	165	154	150	145	137	131	126	121	117	110	105
115	165	165	165	165	152	147	141	133	126	120	114	110	103	98
120	165	165	165	155	149	143	137	129	120	114	109	104	97	92
125	165	165	165	153	147	140	134	123	115	108	103	99	92	87
130	165	165	165	151	144	137	130	118	110	103	98	94	87	82
135	165	165	155	148	141	134	125	114	105	99	94	90	83	78
140	165	165	153	146	138	130	121	110	101	95	90	86	79	74
145	165	165	152	144	135	125	117	106	98	92	87	83	76	71
150	165	165	150	141	132	122	113	102	94	88	83	79	72	68
155	165	156	148	139	128	118	110	99	91	85	80	77	70	65
160	165	155	146	136	125	115	107	96	89	83	78	74	67	62
165	165	153	144	133	122	112	104	94	86	80	75	72	65	60
170	165	152	142	130	119	109	102	91	84	78	73	69	62	58
175	165	150	140	127	116	107	99	89	82	76	71	67	60	56
180	165	149	138	125	114	105	97	87	80	74	69	65	59	54
185	165	148	136	122	111	102	95	85	78	72	67	64	57	52
190	156	146	133	120	109	100	93	83	76	70	66	62	55	51
195	155	144	131	118	107	99	91	82	74	69	64	61	54	49
200	154	143	128	116	105	97	90	80	73	67	63	59	53	48
205	153	141	126	114	103	95	88	79	72	66	62	58	51	47
210	152	140	124	112	102	94	87	77	70	65	60	57	50	46
215	151	138	122	110	100	92	85	76	69	64	59	56	49	45
220	150	136	120	108	99	91	84	75	68	63	58	55	48	44
225	149	134	119	107	97	90	83	74	67	62	57	54	47	43
230	148	132	117	105	96	88	82	73	66	61	56	53	46	42
235	147	130	116	104	95	87	81	72	65	60	56	52	45	41
240	145	129	114	103	94	86	80	71	64	59	55	51	45	40
245	144	127	113	102	93	85	79	70	64	58	54	50	44	40
250	143	125	112	101	92	84	78	69	63	57	53	50	43	39

(continued) الجدول (6-2c) مقاومة القص الأساسية

(c) Grade 50 steel (p_y = 340 N/mm^2)

d/t	Stiffener spacing ratio a/d													
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0
55	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204
60	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204
65	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	194	192
70	204	204	204	204	204	204	204	204	204	194	192	190	187	184
75	204	204	204	204	204	204	204	204	191	188	186	183	179	176
80	204	204	204	204	204	204	204	190	186	182	179	176	171	167
85	204	204	204	204	204	204	191	185	180	176	172	169	162	158
90	204	204	204	204	204	192	187	180	174	169	164	161	154	149
95	204	204	204	204	193	188	183	174	167	162	157	153	144	138
100	204	204	204	204	190	184	178	169	161	154	148	143	134	128
105	204	204	204	193	187	180	173	163	153	145	139	134	125	119
110	204	204	204	190	183	176	168	156	145	137	131	126	117	111
115	204	204	204	187	179	171	163	149	138	130	124	119	110	104
120	204	204	193	184	176	166	156	142	132	124	118	113	104	98
125	204	204	190	181	172	161	150	136	126	119	112	107	99	93
130	204	204	188	178	168	156	145	131	121	114	107	103	94	88
135	204	204	185	175	163	150	140	127	117	109	103	98	89	84
140	204	193	183	171	158	146	135	122	112	105	99	94	86	80
145	204	191	180	168	153	141	131	118	109	101	95	91	82	76
150	204	189	177	164	149	137	128	115	105	98	92	87	79	73
155	204	187	175	159	145	134	124	112	102	95	89	85	76	70
160	204	185	172	156	142	130	121	109	99	92	87	82	73	68
165	204	183	169	152	138	127	118	106	97	90	84	79	71	65
170	193	181	165	149	135	125	116	103	94	87	82	77	69	63
175	192	179	162	146	133	122	113	101	92	85	80	75	67	61
180	190	177	159	143	130	120	111	99	90	83	78	73	65	59
185	189	174	156	140	128	117	109	97	88	82	76	72	63	58
190	188	172	153	138	125	115	107	95	87	80	74	70	62	56
195	186	169	150	135	123	113	105	94	85	78	73	68	60	55
200	185	167	148	133	121	112	103	92	84	77	71	67	59	53
205	183	164	146	131	119	110	102	91	82	76	70	66	58	52
210	182	162	143	129	118	109	100	89	81	74	69	65	57	51
215	180	159	141	127	116	107	99	88	80	73	68	63	55	50
220	179	157	140	126	115	106	98	87	79	72	67	62	54	49
225	177	155	138	124	113	104	97	86	78	71	66	61	53	48
230	175	153	136	123	112	103	96	85	77	70	65	61	53	47
235	173	151	135	121	111	102	95	84	76	69	64	60	52	46
240	171	150	133	120	110	101	94	83	75	68	63	59	51	46
245	169	148	132	119	109	100	93	82	74	68	62	58	50	45
250	167	146	130	118	108	99	92	81	73	67	62	57	50	44

الجدول (6-2d) مقاومة القص الأساسية

(d) Grade 50 steel (p_y = 355 N/mm^2)

d/t	Stiffener spacing ratio a/d													
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0
55	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213
60	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213
65	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	200	198
70	213	213	213	213	213	213	213	213	213	201	198	196	193	190
75	213	213	213	213	213	213	213	202	198	194	192	189	184	181
80	213	213	213	213	213	213	213	197	192	188	184	181	175	171
85	213	213	213	213	213	213	198	191	186	181	177	173	166	162
90	213	213	213	213	213	199	193	186	179	173	169	164	157	151
95	213	213	213	213	201	195	189	180	172	166	160	155	145	139
100	213	213	213	213	197	190	183	173	165	157	150	145	135	129
105	213	213	213	200	193	186	178	167	156	148	141	136	126	120
110	213	213	213	197	189	181	173	159	148	140	133	128	118	112
115	213	213	202	194	185	176	166	152	141	133	126	121	112	105
120	213	213	200	191	181	171	160	145	135	126	120	115	106	99
125	213	213	197	188	177	165	154	139	129	121	114	109	100	94
130	213	213	195	184	173	159	148	134	124	116	110	104	95	89
135	213	202	192	180	167	154	143	129	119	111	105	100	91	85
140	213	200	189	177	162	149	139	125	115	107	101	96	87	81
145	213	198	186	173	157	145	135	121	111	104	97	93	84	77
150	213	196	183	168	153	141	131	118	108	100	94	89	80	74
155	213	194	180	164	149	137	127	114	105	97	91	86	77	72
160	213	192	177	160	146	134	124	111	102	94	89	84	75	69
165	202	189	173	156	142	131	121	109	99	92	86	81	72	67
170	201	187	170	153	139	128	119	106	97	90	84	79	70	64
175	199	185	166	150	136	125	116	104	95	87	82	77	68	62
180	198	183	163	147	134	123	114	102	93	85	80	75	66	61
185	196	180	160	144	131	121	112	100	92	84	78	73	65	59
190	195	177	157	142	129	119	110	98	89	82	76	72	63	57
195	193	174	155	139	127	117	108	96	87	80	75	70	62	56
200	191	172	152	137	125	115	107	95	86	79	73	69	60	55
205	190	169	150	135	123	113	105	93	85	78	72	68	59	53
210	188	167	148	133	121	112	104	92	83	76	71	66	58	52
215	186	164	146	131	120	110	102	91	82	75	70	65	57	51
220	185	162	144	130	118	109	101	90	81	74	69	64	56	50
225	183	160	142	128	117	108	100	89	80	73	68	63	55	49
230	181	158	140	127	116	106	99	88	79	72	67	62	54	48
235	179	156	139	125	114	105	98	87	78	71	66	62	53	48
240	177	154	137	124	113	104	97	86	77	71	65	61	52	47
245	175	153	136	123	112	103	96	85	76	70	64	60	52	46
250	173	151	135	122	111	102	95	84	76	69	64	59	51	45

الجدول (6-3a) معامل مقاومة القص المعتمد على الجناح

Flange dependent shear strength factor, q_f (in N/mm^2)

(a) Grade 43 steel (p_y = 265 N/mm^2)

	Stiffener spacing ratio a/d													
d/t	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	52	67	68
80	0	0	0	0	0	0	0	0	44	79	92	96	96	89
85	0	0	0	0	0	0	0	67	106	119	122	122	114	104
90	0	0	0	0	0	0	51	120	140	145	144	141	128	115
95	0	0	0	0	0	29	116	154	165	165	162	156	139	124
100	0	0	0	0	0	110	155	180	185	182	176	168	148	131
105	0	0	0	0	81	151	184	201	202	196	188	179	156	138
110	0	0	0	0	133	182	208	219	217	209	199	189	165	144
115	0	0	0	79	168	207	228	235	230	221	210	198	171	149
120	0	0	0	132	197	229	247	250	243	232	219	205	176	152
125	0	0	0	168	221	248	263	264	255	241	226	211	180	155
130	0	0	91	197	242	266	278	277	264	248	231	216	183	158
135	0	0	138	221	261	281	293	288	272	254	236	220	186	160
140	0	0	172	243	278	296	307	297	278	259	240	223	188	162
145	0	0	200	262	293	312	318	304	284	263	244	226	190	163
150	0	86	224	279	308	325	328	310	288	267	246	228	192	164
155	0	133	245	296	324	336	336	316	292	270	249	231	193	165
160	0	166	264	311	338	346	343	321	296	272	251	232	194	166
165	0	194	282	325	350	354	349	325	299	275	253	234	195	167
170	0	218	298	340	360	361	355	329	302	277	255	235	196	168
175	0	239	313	354	369	368	359	332	304	279	256	237	197	168
180	65	258	327	366	377	373	364	335	306	280	258	238	198	169
185	116	275	341	377	384	378	367	337	308	282	259	239	199	170
190	151	292	356	386	390	383	371	340	310	283	260	240	199	170
195	178	307	370	394	396	387	374	342	312	285	261	241	200	170
200	202	321	382	402	401	391	377	344	313	286	262	241	200	171
205	223	335	392	408	405	394	379	346	314	287	263	242	201	171
210	242	348	402	414	409	397	382	347	316	288	264	243	201	171
215	260	360	411	420	413	400	384	349	317	289	264	243	202	172
220	276	374	418	425	417	402	386	350	318	289	265	244	202	172
225	291	387	425	429	420	405	388	351	319	290	265	244	202	172
230	305	399	432	433	423	407	389	352	319	291	266	245	203	172
235	319	409	438	437	425	409	391	354	320	291	266	245	203	173
240	332	419	443	441	428	411	392	355	321	292	267	245	203	173
245	344	427	448	444	430	412	394	355	322	292	267	246	203	173
250	356	435	452	447	432	414	395	356	322	293	268	246	204	173

الجدول (6-3b) معامل مقاومة القص المعتمد على الجناح

(b) Grade 43 steel (p_y = 275 N/mm^2)

	Stiffener spacing ratio *a/d*													
d/t	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	40
75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	57	71	80	78
80	0	0	0	0	0	0	0	0	72	97	106	109	106	98
85	0	0	0	0	0	0	0	92	122	133	135	133	123	112
90	0	0	0	0	0	0	83	138	154	158	156	152	137	122
95	0	0	0	0	0	73	136	170	179	178	173	166	148	131
100	0	0	0	0	0	132	173	195	199	195	187	179	157	139
105	0	0	0	0	108	170	210	216	216	209	200	190	166	146
110	0	0	0	0	154	200	225	235	231	222	211	200	174	152
115	0	0	0	109	188	225	245	251	244	235	222	209	180	156
120	0	0	0	155	216	247	264	265	258	245	230	216	184	160
125	0	0	52	189	240	266	280	281	269	254	237	222	188	163
130	0	0	121	217	261	284	296	293	278	260	243	226	191	165
135	0	0	162	241	280	300	312	303	286	266	247	230	194	167
140	0	0	194	262	297	316	325	312	292	271	251	233	196	169
145	0	54	221	282	313	331	336	319	297	275	254	236	198	170
150	0	119	245	300	329	344	345	325	302	278	257	238	200	171
155	0	159	266	316	345	355	353	331	306	282	260	240	201	172
160	0	190	285	331	358	364	360	335	309	284	262	242	202	173
165	0	217	303	347	370	372	366	340	312	287	264	244	203	174
170	0	240	319	363	380	379	371	343	315	289	265	245	204	175
175	32	261	335	376	388	386	376	346	317	290	267	246	205	175
180	106	280	349	388	396	391	380	349	319	292	268	247	206	176
185	146	298	364	398	403	396	384	352	321	294	270	248	207	176
190	177	314	380	407	409	400	387	354	323	295	271	249	207	177
195	203	330	393	415	414	404	390	356	324	296	272	250	208	177
200	226	344	404	422	419	408	393	358	326	297	272	251	208	178
205	247	358	415	429	424	411	396	360	327	298	273	252	209	178
210	266	371	424	434	428	414	398	362	328	299	274	252	209	178
215	283	385	433	440	432	417	400	363	329	300	275	253	210	178
220	299	399	440	445	435	420	402	364	330	301	275	253	210	179
225	314	412	447	449	438	422	404	366	331	302	276	254	210	179
230	329	423	453	453	441	424	405	367	332	302	276	254	211	179
235	343	433	459	457	444	426	407	368	333	303	277	255	211	179
240	356	443	464	460	446	428	408	369	334	303	277	255	211	180
245	368	451	469	463	448	430	410	370	334	304	278	255	211	180
250	380	459	474	466	450	431	411	371	335	304	278	256	212	180

الجدول (6-3c) معامل مقاومة القص المعتمد على الجناح

(c) Grade 50 steel (p_y = 340 N/mm^2)

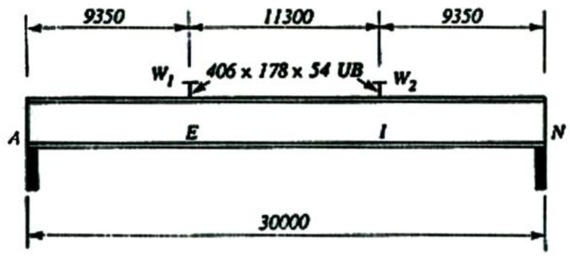
d/t	Stiffener spacing ratio a, 0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	71	76
70	0	0	0	0	0	0	0	0	31	92	110	118	119	112
75	0	0	0	0	0	0	0	85	135	152	157	156	146	133
80	0	0	0	0	0	0	81	160	184	190	188	183	166	149
85	0	0	0	0	0	79	164	207	218	218	212	204	182	161
90	0	0	0	0	0	164	214	242	246	241	232	221	195	171
95	0	0	0	0	143	216	252	270	269	261	249	236	207	181
100	0	0	0	62	202	256	284	295	289	278	265	251	217	189
105	0	0	0	157	245	288	312	316	309	295	279	262	224	195
110	0	0	0	212	281	317	336	337	326	308	289	270	230	199
115	0	0	121	254	312	342	357	356	340	318	297	277	235	203
120	0	0	186	289	339	365	380	371	350	327	304	283	239	206
125	0	0	233	319	363	387	399	384	359	334	310	288	242	208
130	0	53	271	346	385	408	414	394	367	340	314	291	245	210
135	0	148	303	371	407	426	427	402	373	344	318	295	247	212
140	0	202	332	393	429	440	438	410	378	249	321	297	249	213
145	0	244	358	414	447	453	447	416	383	352	324	300	251	214
150	0	279	382	436	462	464	455	421	387	355	327	302	252	215
155	0	309	404	456	475	473	462	426	391	358	329	304	253	216
160	103	337	424	473	486	481	468	430	394	360	331	305	254	217
165	167	362	444	488	496	488	473	434	396	363	333	307	255	218
170	212	385	466	501	504	494	478	437	399	364	334	308	256	218
175	249	406	484	512	512	500	482	440	401	366	336	309	257	219
180	280	426	500	522	519	505	486	443	403	368	337	310	258	219
185	309	445	515	531	525	509	489	445	405	369	338	311	268	220
190	334	463	527	539	530	513	493	447	406	370	339	312	259	220
195	357	483	538	546	535	517	495	449	408	371	340	313	259	221
200	379	501	548	552	540	520	498	451	409	372	341	313	260	221
205	399	518	557	558	544	523	500	453	410	373	342	314	260	221
210	419	532	565	563	548	526	503	454	411	374	342	315	261	222
215	437	545	573	568	551	529	505	456	412	375	343	315	261	222
220	454	557	580	573	554	531	506	457	413	376	343	316	261	222
225	470	567	586	577	557	533	508	458	414	376	344	316	262	222
230	486	577	591	581	560	535	510	459	415	377	345	317	262	223
235	504	586	597	584	562	537	511	460	416	378	345	317	262	223
240	521	594	602	587	565	539	512	461	417	378	345	317	262	223
245	536	601	606	590	567	540	514	462	417	379	346	318	263	223
250	550	608	610	593	569	542	515	463	418	379	346	318	263	223

الجدول (6-3d) معامل مقاومة القص المعتمد على الجناح

(d) Grade 50 steel (p_y = 355 N/mm^2)

d/t	Stiffener spacing ratio a/d													
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	74	93	93
70	0	0	0	0	0	0	0	0	84	120	133	137	134	124
75	0	0	0	0	0	0	0	121	160	173	176	173	160	145
80	0	0	0	0	0	0	122	186	206	209	206	200	179	160
85	0	0	0	0	0	124	192	230	240	237	230	220	195	172
90	0	0	0	0	91	195	240	265	267	260	249	237	208	183
95	0	0	0	0	177	244	278	293	290	280	266	253	221	193
100	0	0	0	119	232	282	310	318	311	299	283	267	230	200
105	0	0	0	193	274	315	337	340	331	315	296	278	237	206
110	0	0	67	243	309	344	361	362	348	327	306	286	243	210
115	0	0	164	284	340	369	385	380	361	337	314	293	248	213
120	0	0	222	319	367	392	407	395	371	345	321	298	251	216
125	0	0	266	349	392	417	425	407	380	352	326	303	254	218
130	0	122	303	376	414	437	440	417	387	357	330	306	257	220
135	0	190	335	401	439	454	452	425	393	362	334	309	259	222
140	0	239	364	424	459	468	463	432	398	366	338	312	261	223
145	0	278	390	447	477	480	472	438	403	370	340	315	263	224
150	0	312	414	470	491	490	480	443	407	373	343	317	264	225
155	74	343	436	489	504	499	486	448	410	375	345	318	265	226
160	158	370	457	505	515	507	492	452	413	378	347	320	266	227
165	210	395	480	519	524	514	498	456	416	380	349	321	267	228
170	251	418	501	532	532	520	502	459	418	382	350	323	268	228
175	285	440	519	543	540	526	507	462	420	383	351	324	269	229
180	316	460	534	552	547	531	510	464	422	385	353	325	270	230
185	344	480	548	561	553	535	514	467	424	386	354	326	270	230
190	369	501	560	569	558	539	517	469	426	388	355	326	271	230
195	392	521	571	576	563	543	520	471	427	389	356	327	271	231
200	414	538	581	582	567	546	522	473	428	390	356	328	272	231
205	435	554	590	588	571	549	524	474	429	391	357	328	272	231
210	454	568	598	593	575	552	527	476	431	392	358	329	272	232
215	473	581	605	598	578	554	529	477	432	392	359	330	273	232
220	490	592	611	602	582	557	530	478	433	393	359	330	273	232
225	507	602	617	606	584	559	532	480	433	394	360	330	273	232
230	526	612	623	610	587	561	534	481	434	394	360	331	274	233
235	544	620	628	613	590	563	535	482	435	395	361	331	274	233
240	561	628	633	616	592	564	536	483	436	395	361	332	274	233
245	575	635	637	619	594	566	538	483	436	396	362	332	274	233
250	589	642	641	622	596	567	539	484	437	396	362	332	275	233

مثال : (6-1) صمم الجائز الصفائحي المبين في الشكل أدناه تحت تأثير الأحمال المبينة على الشكل، علماً أن الجناح العلوي للجائز مقيد تماماً على كامل طوله وأن ماركة الفولاذ 43	



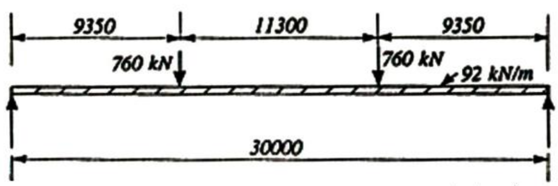
نوع الحمل	الأحمال الميتة	الأحمال الحية
موزع بانتظام	$w_d = 20\,kN/m$	$w_i = 40\,kN/m$
مركّز	$W_{1d} = 200\,kN$	$W_{1i} = 300\,kN$
مركّز	$W_{2d} = 200\,kN$	$W_{2i} = 300\,kN$

الحـــــل :

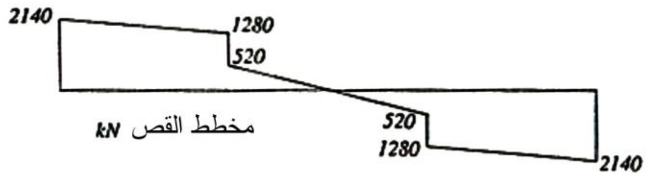
* الأحمال المصعّدة: $w' = 20 \times 1.4 + 40 \times 1.6 = 92\,kN/m$ — الجدول (1-2)

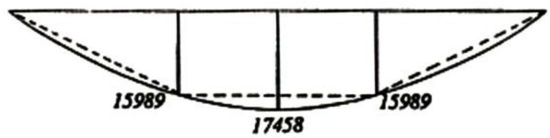
$$W_1' = W_2' = 200 \times 1.4 + 300 \times 1.6 = 760\,kN$$

* يبين الشكل أدناه مخططات الأحمال المصعدة والقص وعزم الانعطاف



الأحمال المصعدة





* اختيار الأبعاد بشكل أولي:

– إن نسبة المجاز إلى ارتفاع مقطع الجائز (l/D) تتراوح بين 12 للجوائز ذات المجازات القصيرة و 20 للجوائز ذات المجازات الطويلة. وسنفرض في هذا المثال $l/D = 15$

الفقرة (6-2)

$$D = l/15 = 30000/15 = 200\,mm$$

– بفرض أن المقاومة التصميمية لفولاذ الجناح $p_y = 255\,N/mm^2$ يمكن حساب مساحة الجناح بشكل تقريبي كما يلي:

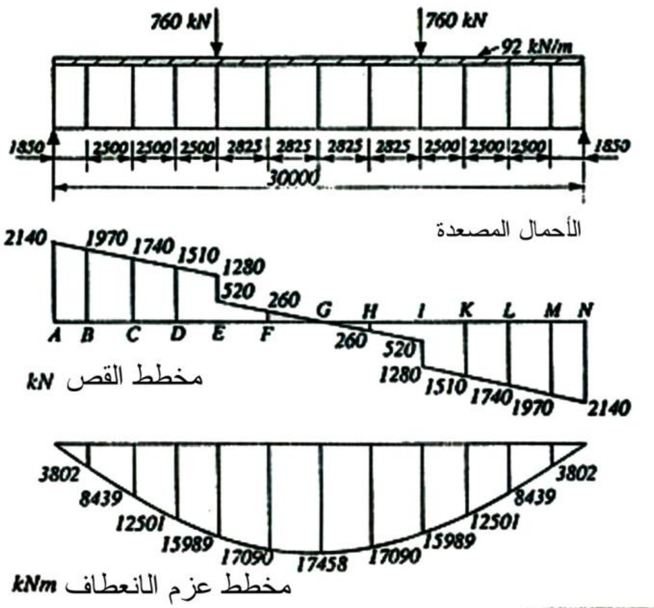
$$A_f \approx M_{\max}/D\,p_y = 17458 \times 10^6 / 2000 \times 255 = 34232\,mm^2$$

يتم اختيار نسبة عرض الجناح إلى ارتفاع المقطع بين 0.3-0.5 لهذا سنختار عرض الجناح 700 mm وسماكته 50 mm فتكون مساحة الجناح $35000\,mm^2$.

– تتراوح سماكة الجسد بين 10 mm للجوائز ذات الارتفاع حتى 1200 mm و 20 mm للجوائز ذات الارتفاع حتى 2500 mm وسنختار هنا t =14 mm. إذاً لنجرب جائزاً صفائحياً بالأبعاد التالية:

$$B = 700\,mm\ ,\ T = 50\,mm\ ,\ d = 2000\,mm\ ,\ t = 14\,mm$$

* تصنيف المقطع	الجدول (2-1)
− إن الجناح مدمج لأن:	
$T = 50\, mm \Rightarrow p_{yf} = 255\, N/mm^2\ ,\ \varepsilon = \left(275/\mathrm{p_{yf}}\right)^{1/2} = 1.04$	
$b/T = \left(B - t\right)/2T = \left(700 - 14\right)/2 \text{ x } 50 = 6.86$	
$b/T = 6.86 < 8.5\ \ \varepsilon = 8.5 \text{ x } 1.04 = 8.48$	الجدول (2-2)
− إن جسد المقطع نحيف لأن:	
$t = 14\, mm \Rightarrow p_{yw} = 275\, N/mm^2\ ,\ \varepsilon = \left(275/275\right)^{1/2} = 1$	الجدولين (2-1,2)
$d/t = 2000/14 = 142.8\ >\ 120\ \ \varepsilon = 120$	
* يجب تحقيق جسد المقطع على تحنيب القص لأن:	
$d/t = 142.8\ >\ 63\ \ \varepsilon = 63$	الفقرة (6-2)
* على فرض أن المسافة بين المدعّمات $a > \mathrm{d}$ فإن سماكة الجسد مناسبة لظروف الاستثمار لأن:	
$t = 14\, mm\ >\ \mathrm{d}/250 = 2000/250 = 8\, mm$	الفقرة (6-2)
* وعلى فرض أن المسافة بين المدعّمات $a > 1.5\,\mathrm{d}$ فإن سماكة الجسد كافية لمنع تحنيب الجناح داخلاً في الجسد لأن:	
$t = 14\, mm > \left(\mathrm{d}/250\right)\left(\mathrm{p_{yf}}/345\right) = \left(2000/250\right)\left(255/345\right) = 5.9\, mm$	الفقرة (6-2)
* رغم إهمال مساهمة الجسد فإن طاقة تحمّل المقطع للعزم أكبر من العزم الأعظمي المطبّق لأن: $\mathrm{M_c} = p_{yf}\ S_{xf}$	العلاقة (6-1)
$\mathrm{S_{xf}} = A_f \text{ x } \left(d + T\right) = 35000 \text{ x } \left(2000 + 50\right) = 71.75 \text{ x } 10^6\ mm^3$	
$\mathrm{M_c} = 255 \text{ x } 71.75 \text{ x } 10^6 \text{ x } 10^{-6} = 18296\, kNm > 17458\ \ o.k.$	
* ويبين الشكل أدناه توزعاً مقترحاً للمدعّمات على طول مجاز الجائز.	



* على الرغم من أن الكود سمح بالاستفادة من فعل حقل الشد في تصميم اللوح الطرفي AB من الجائز، سنقوم هنا بتحقيقه دون الاستفادة من ذلك

$d = 2000\,mm\ ,\ t = 14\,mm\ ,\ d/t = 2000/14 = 142.8$

$a/d = 1850/2000 = 0.925\ ,\ p_y = 275\,N/mm^2$

بالعودة للجدول (6-1b) نجد إجهاد القص الحرج

الجدول (6-1b) $q_{cr} = 94.2\,N/mm^2$

ومنه تحسب قوة القص التي يتحملها الجائز كما يلي:

العلاقة (6-2) $V_{cr} = q_{cr}\ dt = 94.2 \text{ x } 2000 \text{ x } 14 \text{ x } 10^{-3} = 2637\,kN$

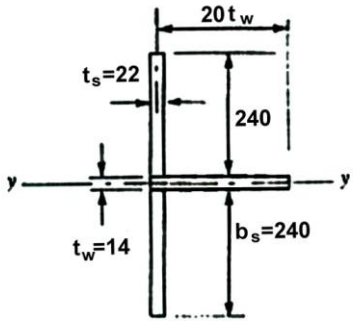
$V_{cr} > F_{vA} = 2140\,kN$ o.k.

إذاً لا حاجة لاستخدام فعل حقل الشد.

ويجب تحقيق اللوح AB كجائز يمتد بين جناحي الجائز الصفائحي

	ويتحمل قوة R_{tf} وعزماً M_{tf} ناجمين عن تثبيت قوة حقل الشد الناتجة في اللوح BC.
العلاقات (6-7,8,9)	$M_{tf} = H_q\, d/10\ ,\ R_{tf} = 0.5\, H_q$ $H_q = 0.75\, d\, t\, p_y \left(1 - q_{cr}/(0.6\, p_y)\right)^{1/2}$ $H_q = 0.75 \text{ x } 2000 \text{ x } 14 \text{ x } 275 \left(1 - 94.2/(0.6 \text{ x } 275)\right)^{1/2} \text{ x } 10^{-3}$ $= 3782.4\ kN$ $R_{tf} = 0.5 \text{ x} 3782.4 = 1891.2\ kN$ $M_{tf} = 3782.4 \text{ x } 2000 \text{ x} 10^{-3}/10 = 756.5\, kNm$ تحسب طاقة تحمّل اللوح AB للقص باعتباره جائزاً ممتداً شاقولياً بين جناحي الجائز الصفائحي كما يلي:
العلاقة (5-1)	$P_v = 0.6\, p_{yw}\, A_v\ ,\ A_v = ta$ $P_v = 0.6 \text{ x } 275 \text{ x } 14 \text{ x } 1850 \text{ x } 10^{-3} = 4273.5\, kN > R_{tf} \quad o.k.$ سنحسب طاقة تحمّل اللوح AB للعزم باعتباره جائزاً ممتداً شاقولياً بين جناحي الجائز الصفائحي كما يلي: $M_q = I\ p_y / y\ ,\ y = a/2 = 1850/2 = 925\, m$ $I = t\, a^3/12 = 14 \text{ x } (1850)^3/12 = 738689.6 \text{ x } 10^4\ mm^4$ $M_q = 738689.6 \text{ x } 10^4 \text{ x } 275 \text{ x } 10^{-6}/925$ $= 2196\, kN\, mm > M_{tf} \quad o.k.$ يجب الملاحظة أنه تم حساب عزم العطالة I دون استخدام مساهمة المدعّمتين المحيطتين باللـــوح AB وفـــي حال بينت الحسابات أن M_{tf}

	أكبر من التحمّل M_q لا بد من أخذ مساهمة المدعّمتين بالاعتبار.
	* تحقيق اللوح BC : سنقوم بتحقيقه بالاستفادة من فعل حقل الشد
	$d = 2000\,mm\ ,\ \ t = 14\,mm\ ,\ d/t = 142.8$
	$a/t = 2500/2000 = 1.25\ \ ,\ \ p_y = 275\,N/mm^2$
	بالعودة إلى الجدول (6-2b) نحدد مقاومة القص الأساسية
	$q_b = 105.6\,N/mm^2$ بإهمال مقاومة القص المعتمدة على الجناحين.
	تحدد مقاومة اللوح لتجنيب القص وفق العلاقة التالية:
العلاقة (6-3)	$V_b = q_b\, d\, t = 105.6 \text{ x } 2000 \text{ x } 14 \text{ x } 10^{-3} = 2956\,kN > F_{vB} = 1970$
	تجدر الملاحظة أنه إذا بينت الحسابات أن مقاومة اللوح لتجنيب القص وفق العلاقة المختصرة أعلاه أقل من قوة القص المطبّقة ، فلا بد عندها من أخذ مقاومة القص المعتمدة على الجناحين بالحسبان وفق العلاقة (6-3).
	* تصميم المدعّمة في A : يجب تصميم المدعّمة لتتحمّل قوة ضغط ناتجة عن رد الفعل F_b مضافاً إليها قوة ضغط أخرى F_m ناتجة عن العزم M_{tf}
	$F_b = 2140\,kN\ \ ,\ \ F_m = M_{tf}/a = 756.5 \text{ x } 10^3/1850 = 409\,kN$
	$F_x = F_b + F_m = 2140 + 409 = 2549\,kN$
	- تحقيق أبعاد المدعّمة:
	لنجرب مدعّمة تتألف من صفيحتين عرض كل منهما $240\,mm$ وسماكتها $t_s = 22\,mm$ ولنفرض أنه تم قطع زاوية كل صفيحة بمقدار $15\,mm$ عند لحام الجسد مع الجناح.
الجدول (2-1)	$t_s = 22\,mm \Rightarrow p_{ys} = 265\,N/mm^2\ \ ,\ \varepsilon = (275/265)^{1/2} = 1.02$
	تحسب مساحة تماس المدعّمة مع الجناح كما يلي:

	$A = (240 - 15) \text{ x } 22 \text{ x } 2 = 9900\, mm^2$
العلاقة (6-10)	$A = 9900\, mm^2 > 0.8\, F_x \,/\, p_{ys} = 0.8 \text{ x } 2549 \text{ x} 10^3 / 265$
	$= 7695\, mm^2 \qquad o.k.$
الفقرة (6-4-3)	يجب أن يكون عرض أي من صفيحتي المدعّمة اصغر من $19\, t_s\, \varepsilon$
	$b_s = 240\, mm < 19\, t_s\, \varepsilon = 19 \text{ x } 22 \text{ x} 1.02 = 425\, mm \qquad o.k.$
	كما يجب أن لا يزيد عرض الصفيحة الواحدة المستخدم في الحساب عن $13\, t_s \varepsilon$.
	$b_s = 240\, mm < 13 \text{ x } 22 \text{ x} 1.02 = 291\, mm \qquad o.k.$
	تحقيق المدعّمة على التحنيب:
الفقرة (6-4-1)	يبين الشكل أدناه المقطع الفعّال للجسد والمدعّمة الذي سيقاوم التحنيب
	
	$I_y = \dfrac{22 \text{ x} 494^3}{12} + \dfrac{269 \text{ x} 14^3}{12} = 22107.6 \text{ x} 10^4\ mm^4$
	$A_E = 240 \text{ x } 22 \text{ x } 2 + 14 \text{ x } (22 + 269) = 14634\, mm^2$
	$r_y = (I_y / A_E)^{1/2} = 122.9\, mm$
	باعتبار أن الجناح ممنوع من الدوران في مستوي المدعّمة فإن الطول الفعّال للمدعّمة هو:
	$L_s = 0.7\, d = 0.7 \text{ x } 2000 = 1400\, mm$
الفقرة	$\lambda = L_E / r_y = 1400 / 122.9 = 11.4$

(6-4-1) ونظراً لأن المقطع الفعّال مشكّل باللحام فيجب تخفيض المقاومة التصميمية وفقاً للفقرة (2-4) لتصبح:

$\bar{p}_y = 265 - 20 = 245\ N/mm^2$

وبالعودة للجدول (4-3c) لتحديد مقاومة الضغط p_c بدلالة λ و $\bar{p}_y$ نجد

$p_c = 245\ N/mm^2$

ومنه تحدد طاقة تحمّل المدعّمة على التحنيب كما يلي:

العلاقة (4-1)

$P_q = p_c\ A_E = 245 \text{ x } 14634 \text{ x } 10^{-3} = 3585\ kN$

إذاً المقطع الفعّال آمن على التحنيب لأن:

$P_q = 3585\ kN > F_x = 2549\ kN$

– تحقيق مقاومة المدعّمة على التحمّل

يحدد تحمّل جسد المقطع وفقاً للفقرة (6-5) كما يلي:

العلاقة (5-13)

$P_{cw} = (b_1 + n_2)\, t\ p_{yw}$

بفرض أن طول التحميل الصلب $b_1 = 0$ وأن n_1 تحدد بخط انتشار الحمل في جناح الجائز بميل قدره 2.5 / 1 على مستوي الجناح وصولاً إلى نقطة التقاء الجسد مع الجناح نجد:

$n_2 = 2.5 \text{ x } 50 \text{ x } 2 = 250\ mm$

$P_{cw} = (0 + 250) \text{ x } 14 \text{ x } 275 \text{ x } 10^{-3} = 962.5\ kN$

وعليه فإن المدعّمة يجب أن تتحمّل الفرق بين القوة المطبّقة F_x وتحمل الجسد P_{cw} أي:

$F_A = F_x - P_{cw} = 2549 - 962.5 = 1586.5\ kN$

يحدد تحمّل المدعّمة بمفردها كما يلي:

$P_A = p_{ys}\ A = 265 \text{ x } 9900 = 2623\ kN > F_A \qquad o.k.$

* تصميم المدعّمات الوسطية الواقعة عند G, F, D, C, B

سنقوم بتصميم المدعّمة عند المقطع B كونها الأكثر حرجاً ونعمّمها على المواقع الأخرى.

- اختيار أبعاد المدعّمة:

إن المسافة العظمى التي تفصل بين المدعّمات كما هو موضح في الأشكال أعلاه هي:

$$a = 2825\, mm < d\sqrt{2} = 2000\sqrt{2} = 2828\, mm$$

وعليه فإن عزم عطالة المدعّمة يجب أن يحقق العلاقة (6-12) أي:

$$I_s \geq 1.5\, d^3 t^3 / a^2 = 1.5 \text{ x } 2000^3 \text{ x } 14^3 / 2500^2 = 526.8 \text{ x } 10^4\ mm^4$$

لتحقيق ذلك سنختار مدعّمة مؤلفة من صفيحتين أبعاد كل منهما $80 \text{ x } 13\, mm$ وبطول يساوي ارتفاع الجسد

بروز المدعّمة = $13\, t_s\ \varepsilon = 13 \text{ x } 13 \text{ x } 1 = 169\ mm > 80\ mm$

وعزم عطالتها

$$I_s = \left(13 \text{ x } 174^3 - 13 \text{ x } 14^3\right)/12$$
$$= 570 \text{ x } 10^4\ mm^4 \geq 526.8 \text{ x } 10^4\ mm^4 \qquad o.k.$$

- تحقيق المدعّمة على التحنيب:

تحدد القوة المطبّقة على المدعّمة وفق العلاقة (6-13) أي:

$$F_q = V - V_s \leq P_q$$

حيث : V قوة القص عند المدعّمة B وتساوي $1970\, kN$

$$V_s = V_{cr} = q_{cr} d\, t \ \leq\ P_q$$

يحدد إجهاد القص الحرج q_{cr} من الجدول (6-16) بدلالة:

الجدول (6-16)

$$\left.\begin{aligned} a/d &= 2825/2000 = 1.41 \\ d/t &= 2000/14 = 142.8 \\ p_y &= 275 \end{aligned}\right\} \Rightarrow q_{cr} = 67.9\, kN$$

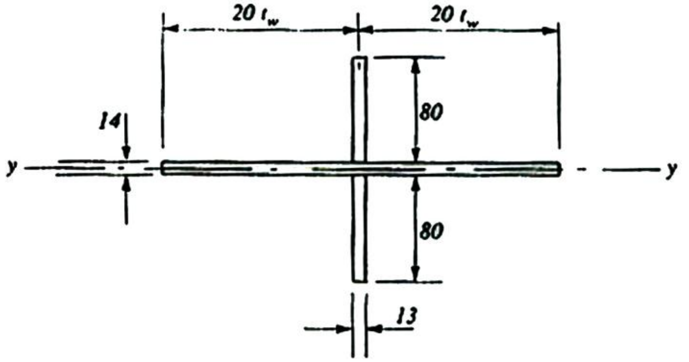
الفقرة (4-2)

ومنه:

$$V_s = 67.9 \text{ x } 2000 \text{ x } 14 = 1900\, kN$$

$$F_q = 1970 - 1900 = 70\, kN$$

يبين الشكل أدناه المقطع الفعّال للمدعّمة والجسد



$$20\, t_W = 20 \text{ x } 14 = 280\, m$$

$$A = 160 \text{ x } 13 + 2 \text{ x } 280 \text{ x } 4 = 9920\, mm^2$$

$$I_y = \left(13 \text{ x } 174^3 + 560 \text{ x } 14^3 - 13 \text{ x } 14^3\right) / 12 = 583.2 \text{ x } 10^4\ mm^4$$

$$r_y = \left(I_y / A\right)^{1/2} = \left(583.2 \text{ x } 10^4 / 9920\right)^{1/2} = 24.25\, mm$$

$$L_E = 0.7\, d = 0.7 \text{ x } 2000 = 1400\, mm$$

$$\lambda = L_E / r_y = 1400 / 24.25 = 57.7$$

وعلى اعتبار أن المقطع الفعّال المؤلف من المدعّمة وجزء من الجسد مشكّل باللحام لا بد من تخفيض المقاومة التصميمية بـــ $20\, N/mm^2$ فتكون المقاومة التصميمية المخفّضة $\bar{p}_y = 275 - 20 = 255\, N/mm^2$ باستخدام λ و $\bar{p}_y$ وبالعودة للجدول (4-3c) نجد الإجهاد الأعظمي المسموح بتطبيقه على المقطع دون أن يحنّب $p_c = 192.6\ N/mm^2$ ومنه طاقة تحمّل المقطع

$P_q = p_c\ A = 192.6 \text{ x } 9920 = 1910.6\ kN > F_q = 70\,kN \quad o.k.$

* تصميم المدعّمة عند E

سنختار مدعّمة مماثلة من حيث الأبعاد للمدعّمة الواقعة عند B أي مؤلفة من صفيحتين أبعاد كل منهما $13 \text{ x } 80\,mm$ وبطول يساوي ارتفاع الجسد وبالتالي فإن بروز المدعّمة وعزم عطالتها محققين كما هو الحال في المدعّمة عند B.

تحدد القوة المطبّقة على المدعّمة وفق العلاقة (6-13) أي:

العلاقة (6-13)

$F_q = V - V_s \le P_q$

حيث : V قوة القص عند المدعّمة E وتساوي $1280\,kN$

كما في المدعّمة عند B $\quad V_s = V_{cr} = 1900\,kN$

$F_q = V - V_s = 1280 - 1900 < 0$

إذاً لا ينشأ حقل شد في أي من اللوحين المجاورين للمدعّمة E

وكما في المدعّمة B فإن $P_q = 192.6\,kN$ وبالتالي العلاقة (6-13) محققة. كما يجب أن تحقق المدعّمة E علاقة الترابط (6-14) كون المدعّمة وسطية وتحمل حملاً خارجياً أي :

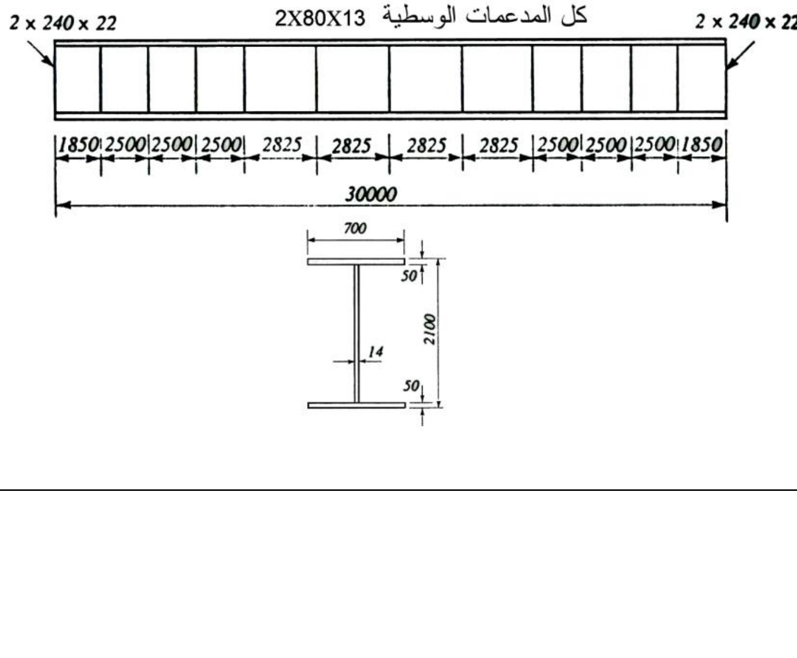
العلاقة (6-14)

$$\frac{F_q - F_x}{P_q} + \frac{F_x}{P_x} + \frac{M_s}{M_{ys}} \le 1$$

$F_x = 760\,kN$ الحمل المطبّق الخارجي ، $M_s = 0$ العزم الناجم عن الأحمال اللامركزية.

تؤخذ $F_q - F_x = 0$ لأن F_q سالبة.

$P_x = P_q = 1910.6\,kN$ لأن الجناح ممنوع من الدوران تماماً في مستوي المدعّمة.

نعوض في علاقة الترابط فنجد : $1 > \frac{760}{1910.6}$ والعلاقة محققة. * تحقيق الجسد بين المدعّمات وفقاً للفقرة (6-6) يجب $f_{ed} \leq p_{ed}$ حيث $f_{ed} = w'/t = 92/14 = 6.57\ N/mm^2$ وباعتبار أن الجناح ممنوع من الدوران بالنسبة للجسد فإن:	
$p_{ed} = \left[2.75 + \frac{2}{(2852/2000)^2}\right]\frac{205000}{(2000/14)^2} = 37.7\ N/mm^2$	العلاقة (6-15)
إذاً الجسد آمن لأن : $f_{ed} = 6.57 < p_{ed}$ إذاً سيكون الشكل النهائي للجائز كما يلي: 	

الفصل السابع
تصميم العناصر المضغوطة الخاصة

1 - 7 العناصر المضغوطة المشكلة من زوايا ومجاري ومقاطع T

يمكن إهمال اللامركزية الناتجة عن الوصلات الطبيعية في نهاية هذا النوع من العناصر على أن يتم الالتزام بالشروط التصميمية المدونة أدناه مع اعتبار طول العنصر L مساوياً المسافة بين نقطتي تقاطع محاور العناصر أو امتداد محاور صفوف البراغي وأخذ نصف قطر العطالة r حول المحور المدروس، مع الانتباه إلى أن القيود الجانبية في مجاز العنصر المضغوط تخفّض L عند دراسة التحنيب. فمثلاً في العنصر المشكل من زاوية واحدة يؤخذ الطول L_{vv} مساوياً للمسافة بين القيود الجانبية سواءً كانت القيود متعامدة أم لا م ع أي من المحورين الموازيين لساقي الزاوية

1 – العنصر المضغوط مشكل من زاوية واحدة غير مستمرة وموصولة من طرفيها إلى صفيحتي وصل أو إلى عناصر أخرى بواسطة صف واحد مكون من برغيين على الأقل من كل طرف على طول الزاوية أو بواسطة لحام مكافئ، تؤخذ عندها نسبة النحافة الأكبر مما هو مبين في البند (1) من الجدول (1 -7).

2 – العنصر المضغوط مشكل من زاوية واحدة غير مستمرة وموصولة من طرفيها إلى صفيحتي وصل أو إلى عناصر أخرى بواسطة برغي واحد من كل طرف، تؤخذ عندها نسبة النحافة الأكبر مما هو مبين في البند (2) من

الجدول (7-1). كما تؤخذ طاقة تحمل العنصر مساوية إلى % 80 من طاقة تحمله فيما لو كان محملاً محورياً.

3 – العنصر المضغوط مشكل من زاويتين غير مستمرتين وموصولتين عند طرفيهما إلى صفائح وصل أو عناصر أخرى مع تربيط الزاويتين ببعضهما ظهر لظهر بواسطة براغي أو لحام بحيث :

* يُقسم طول العنصر إلى ثلاثة أجزاء متساوية تقريباً على الأقل .

- لا تزيد نسبة نحافة الزاوية الواحدة $\lambda_c = L_{vv} / r_{vv}$ العظمى عن 50

حيث L_{vv} المسافة بين أي نقطتين تربيط

r_{vv} نصف قطر العطالة الأصغري للزاوية

- لا تقل نسبة نحافة العنصر المضغوط الكلي العظمى λ_b حول محور موازٍ للسطح المربّط عن $1.4\,\lambda_c$

حيث : $\lambda_b = \left(\lambda_m^2 + \lambda_c^2\right)^{1/2}$

λ_m نسبة نحافة العنصر الكلي حول نفس المحور.

* لا يقل قطر براغي الربط عن *16 mm* على أن تكون قادرة على نقل القص الطولي بين الزاويتين والناتج عن قص عرضي مقداره Q *مساوي % 2.5* من القوة الضاغطة في أي نقطة على طول العنصر. ويحدد القص الطولي بـــ $0.25\,Q\,\lambda_c$

* يتم الربط بين الزاويتين ببرغي أو لحام مباشرة في حال التلاصق الكامل بين الزاويتين أو بوضع حشوة بين المقطعين في حال وجود مسافة بينهما كما هو موضح في الشكل (3-2)

a – عندما تكون الزاويتان موصلتين بطرفيهما إلى جانب واحد من صفائح الوصل أو عناصر أخرى. تؤخذ نسبة النحافة الأكبر وفق أحد البندين التاليين:

- وفق البند (3) من الجدول (7-1) عندما يتم الربط مع صفيحة الوصل بصف مؤلف من برغيين على الأقل على طول الزاوية أو بلحام مكافئ.
- وفق البند (4) من الجدول (7-1) عندما يكون الربط مع صفيحة الوصل ببرغي واحد.

b – عندما تكون الزاويتان موصولتين بطرفيهما إلى جانبي صفائح الربط أو مباشرة إلى جانبي عناصر أخرى. تؤخذ نسبة النحافة الأكبر وفق أحد البندين التاليين:

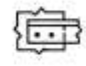
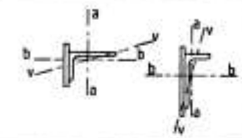
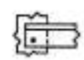
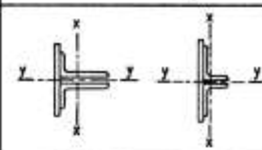
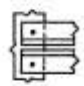
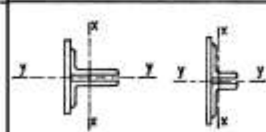
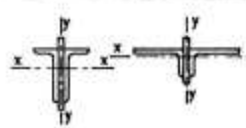
- وفق البند (5) من الجدول (7-1) عندما يتم الربط مع صفيحة الوصل بصف مؤلف من برغيين على الأقل على طول الزاوية أو بلحام مكافئ.
- وفق البند (6) من الجدول (7-1) عندما يتم الربط مع صفيحة الوصل ببرغي واحد. وتؤخذ طاقة تحمل العنصر مساوية إلى % 80 من طاقة تحمله فيما لو كان محملاً محورياً.

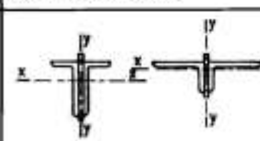
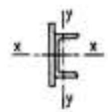
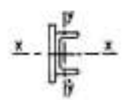
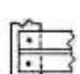
4 – العنصر المضغوط مشكل من مجراية واحدة موصلة بجسدها إلى صفيحة وصل أو عنصر آخر، تحدد نسبة النحافة الأكبر وفق إحدى الحالتين التاليتين:

* وفق البند (7) من الجدول (7-1) عندما يتم الربط مع صفيحة الوصل بصفين أو أكثر من البراغي المتوضعة بشكل متناظر حول محور الجسد في كل من الطرفين أو أن يتم الربط بوصلة لحام مكافئة.
* وفق البند (8) من الجدول (7-1) عندما يتم الربط بصف واحد مؤلف من برغيين على الأقل متوضعين بشكل متناظر حول محور الجسد أو أن يتم الربط بوصلة لحام مكافئة.

5 – العنصر المضغوط يتألف من مقطع T واحد موصول بجناحه إلى صفيحة وصل أو عنصر آخر. تحدد نسبة النحافة الأكبر وفق إحدى الحالتين التاليتين:

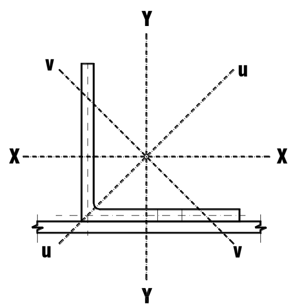
* وفق البند (9) من الجدول (7-1) عندما يتم الربط مع صفيحة الوصل في كل طرف بصفين أو أكثر من البراغي المتوضعة بشكل متناظر بالنسبة لجسد العنصر أو بوصلة لحام مكافئة.
* وفق البند (10) من الجدول (7-1) عندما يتم الربط مع صفيحة الوصل في كل طرف بصف واحد مؤلف من برغيين على الأقل متوضعة بشكل متناظر بالنسبة لجسد العنصر أو بوصلة لحام مكافئة.

Angle, channel and T-section struts			الجدول (1 - 7) مقاطع مضغوطة على شكل زوايا ومجاري ومقاطع T
رقم No.	الوصلة **Connection**	المقاطع والمحاور **Sections and axes**	نسبة النحافة **Slenderness ratios**
1			vv axis: $0.85L_{vv}/r_{vv}$ but $\geqslant 0.7L_{vv}/r_{vv} + 15$ aa axis: $1.0L_{aa}/r_{aa}$ but $\geqslant 0.7L_{aa}/r_{aa} + 30$ bb axis: $0.85L_{bb}/r_{bb}$ but $\geqslant 0.7L_{bb}/r_{bb} + 30$
2			vv axis: $1.0L_{vv}/r_{vv}$ but $\geqslant 0.7L_{vv}/r_{vv} + 15$ aa axis: $1.0L_{aa}/r_{aa}$ but $\geqslant 0.7L_{aa}/r_{aa} + 30$ bb axis: $1.0L_{bb}/r_{bb}$ but $\geqslant 0.7L_{bb}/r_{bb} + 30$
3			xx axis: $1.0L_{xx}/r_{xx}$ but $\geqslant 0.7L_{xx}/r_{xx} + 30$ yy axis: $[(0.85L_{yy}/r_{yy})^2 + \lambda_c^2]^{1/2}$ but $\geqslant 1.4\lambda_c$
4			xx axis: $1.0L_{xx}/r_{xx}$ but $\geqslant 0.7L_{xx}/r_{xx} + 30$ yy axis: $[(L_{yy}/r_{yy})^2 + \lambda_c^2]^{1/2}$ but $\geqslant 1.4\lambda_c$
5			xx axis: $0.85L_{xx}/r_{xx}$ but $\geqslant 0.7L_{xx}/r_{xx} + 30$ yy axis: $[(L_{yy}/r_{yy})^2 + \lambda_c^2]^{1/2}$ but $\geqslant 1.4\lambda_c$

Angle, channel and T-section struts			تابع الجدول (7 - 1)
رقم No.	الوصلة Connection	المقاطع والمحاور Sections and axes	نسبة النحافة Slenderness ratios
6			xx axis: $1.0L_{xx}/r_{xx}$ but $\geq 0.7L_{xx}/r_{xx} + 30$ yy axis: $[(L_{yy}/r_{yy})^2 + \lambda_c^2]^{1/2}$ but $\geq 1.4\lambda_c$
7			xx axis: $0.85L_{xx}/r_{xx}$ yy axis: $1.0L_{yy}/r_{yy}$ but $\geq 0.7L_{yy}/r_{yy} + 30$
8			xx axis: $1.0L_{xx}/r_{xx}$ yy axis: $1.0L_{yy}/r_{yy}$ but $\geq 0.7L_{yy}/r_{yy} + 30$
9			xx axis: $1.0L_{xx}/r_{xx}$ but $\geq 0.7L_{xx}/r_{xx} + 30$ yy axis: $0.85L_{yy}/r_{yy}$
10			xx axis: $1.0L_{xx}/r_{xx}$ but $\geq 0.7L_{xx}/r_{xx} + 30$ yy axis: $1.0L_{yy}/r_{yy}$

مثال : (7-1)

عنصر مضغوط طرفاه ممسوكان في موضعهما وحرّان في الدوران.
طوله $360\ cm$ ومقطعه يتألف من زاوية منفردة $L120\,\text{x}\,120\,\text{x}\,10\,mm$
موصولة ببرغيين إلى صفيحة وصل في كل من طرفيها (كما في الشكل أدناه). احسب قوة تحمل العنصر على الضغط المحوري علماً أن ماركة الفولاذ 43



الحـــــل :

* من جداول المقاطع الفولاذية نجد :

$A = 23.3\,cm^2\ ,\ r_x = r_y = 3.69\,cm\ ,\ r_u = 4.65\,cm\ ,\ r_v = 2.37\,cm$

* تحدد نسبة النحافة وفقاً للبند (1) من الجدول (7-1) وتؤخذ الأكبر ممايلي :

الجدول (7-1)

$\lambda_v = 0.85\,L_v/r_v = 0.85\,\text{x}\,360/2.37 = 129$

كما يجب $\lambda_v \geq 0.7\,L_v/r_v + 15 = 0.7\,\text{x}\,360/2.37 + 15 = 121$

إذاً $\lambda_v = 129$

$\lambda_x = 1.0\,L_x/r_x = 1.0\,\text{x}\,360/3.69 = 97.5$

كما يجب $\lambda_x \geq 0.7\,L_x/r_x + 30 = 0.7\,\text{x}\,360/3.69 + 30 = 98.3$

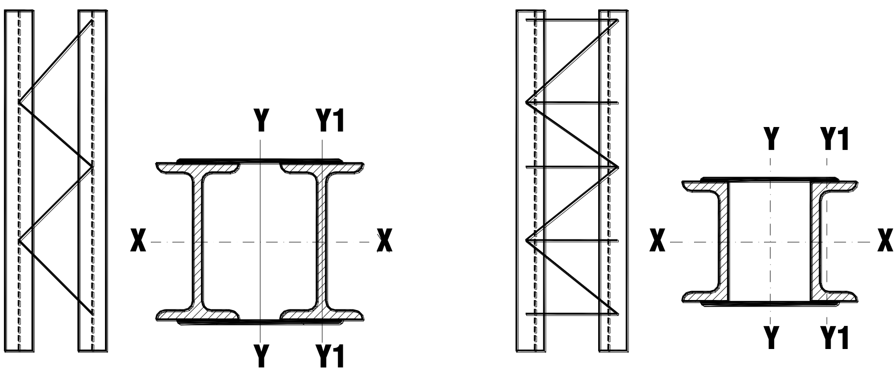
إذاً $\lambda_x = 98.3$

$\lambda_y = 0.85\,L_y/r_y = 0.85\,\text{x}\,360/3.69 = 83$

	كما يجب $\lambda_y \geq 0.7\, L_y/r_y + 30 = 0.7 \text{ x } 360/3.69 + 30 = 98.3$
	إذاً $\lambda_y = 98.3$
	بمقارنة $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_v$ نجد $\lambda_{max} = \lambda_v = 129$
الجدول (2-1)	* باعتبار أن السماكة $T = 10\ mm$ فإن $p_y = 275\ N/mm^2$ $\varepsilon \left(275/p_y\right)^{1/2} = 1$
الجدول (2-2)	* إن المقطع نحيف لأن $b/T = d/T = 120/10 = 12 < 15\varepsilon = 15 \text{ x } 1 = 15$ $(b+d)/T = (120+120)/10 = 24 > 23\varepsilon = 23 \text{ x } 1 = 23$
	لذلك لا بد من تخفيض المقاومة التصميمية p_y وفقاً للفقرة (2-3) ويؤخذ عامل التخفيض الأصغر مما يلي :
الجدول (2-3)	م عامل تخفيض $p_y = 11/(d/T\varepsilon - 4) = 11/(120/10 \text{ x } 1 - 4) = 1.375$ أو : معامل تخفيض $p_y = 19/\left[(b+d)/T\varepsilon - 4\right]$ $= 19/\left[(120+120)/10 \text{ x } 1 - 4\right] = 0.95$
	إذاً معامل تخفيض $p_y = 0.95$ وعليه تصبح المقاومة التصميمية المخفضة: $\bar{p}_y = 0.95 \text{ x } 275 = 261\ N/mm^2$
	بالعودة للجدول (2-4) يتبين أنه لتحديد مقاومة الضغط p_c لا بد من استخدام الجدول (4-3c) بدلالة نسبة النحافة λ_{max} و $\bar{p}_y$ فنجد : $p_c = 85\ N/mm^2$
العلاقة (4-1)	وعليه تحسب طاقة تحمل المقطع وفق العلاقة : $P_c = A_g\, p_c = 23.3 \text{ x } 100 \text{ x } 85 \text{ x } 10^{-3} = 198\ kN$

7-2 الأعمدة المربطة Laced struts

قد تدعو الحاجة أحياناً إلى استخدام أكثر من مقطع لتشكيل مقطع عمود. وكي تعمل هذه المقاطع معاً كعنصر واحد لا بد من تربيطها بقضبان ربط. ويبين الشكل (7-1) طريقتين من طرائق التربيط.



الشكل (7-1) عمود مربّط

ولكي يعمل عمود مربّط كعنصر واحد لا بد من تحقيق الشروط التالية:

1 – يتم تقييد العناصر الرئيسية المكونة للعمود بشكل فعّال ضد التحنيب بجملة تربيط مؤلفة من قضبان مبسّطة أو مقاطع تشكل مثلثات فيما بينها على أوجه العمود وبحيث يكون نظام التربيط منتظماً إلى حد ما على طول العمود وأن لا تقل زاوية ميل قضبان التربيط مع محور العمود عن 40° وأن لا تزيد عن 70°

2 – عند نهايتي جملة التربيط أو عندما تُقطع جملة التربيط أو عند التقاء العمود بعناصر أخرى، لا بد من تربيط العناصر الرئيسية في مستو عمودي على

محور العمود بعوارض أو بقضبان متصالبة. وفي كلا الحالتين يجب تصميم هذه العناصر الداعمة لتتحمل القوى التي صممت عليها جملة التربيط.

3 - يجب أن لا تزيد نسبة النحافة العظمى λ_c للعناصر الرئيسية المكونة للعمود على 50 على أن يؤخذ الطول الفعال للعنصر مساوياً للمسافة بين نقطتي تربيط متتاليتين على طوله وأن يؤخذ نصف قطر العطالة الأصغر للعنصر ويجب أن لا تقل نسبة النحافة العظمى للعمود ككل عن $1.4\lambda_c$

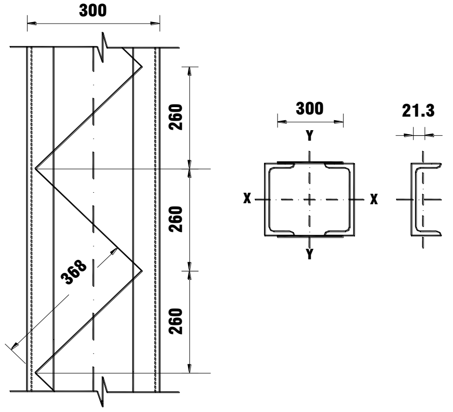
4 - يجب أن لا تزيد نسبة نحافة قضبان التربيط على 180 على أن يؤخذ الطول الفعال مساوياً للمسافة الداخلية بين اللحامين الرابطين لقضيب الربط مع العمود . أما في حال التربيط المزدوج فيؤخذ الطول الفعال مساوياً70% من المسافة ذاتها على أن يتم لحام قضبان شبكات التربيط المزدوج مع بعضها عند تقاطعها.

5 - تصمم قضبان التربيط لتتحمل قوة قص جانبية مقدارها 2.5 % من القوة الضاغطة المحورية المصعّدة في العمود ، تقسم القوة القاصة هذه بالتساوي بين قضبان التربيط الواقعة في مستويات متوازية ، فإذا وجدت قضبان التربيط في مستويين متوازيين تقسم هذه القوة على اثنين ، كما يضاف إلى القوة القاصة السابقة قوة القص الناجمة عن عزم الانعطاف إذا كان العمود خاضعاً لعزم انعطاف ناتج عن لا مركزية أو عزم مطبق أو قوى جانبية.

مثال : (7-2)

صمم العمود المربّط المبين في الشكل أدناه، علماً أن طوله $8\ m$ ومشكل من مجرايتين مع نظام التربيط المبين في الشكل، وأن ماركة الفولاذ 43 وأن العمود مقيد في موضعه عند طرفيه وحر في الدوران حول المحور y في كلا الطرفين وممنوع من الدوران جزئياً في كلا طرفيه حول المحور x وأن الحمل المحوري المصعد والمطبق على العمود هو

$F_c = 910 \quad kN$



الحـــــل :

* سنختار من جداول المقاطع الفولاذية مجرايتين قياس $203\text{x}76$ حيث:

$D = 203.2\,mm \quad , \quad B = 76.2\,mm \quad , \quad T = 11.2\,mm \quad , \quad t = 7.1\,mm$

$d = 152.2\,mm \quad , \quad r_x = 8.02\,cm \quad , \quad r_y = 2.23\,cm \quad , \quad I_y = 151\,cm$

$A = 30.3\,cm^2$

الجدول (2-1)

* بما أن : $T = 11.2\,mm$ فإن: $p_y = 275\ N/mm^2$

و $\varepsilon = \left(275/P_Y\right)^{1/2} = 1.0$

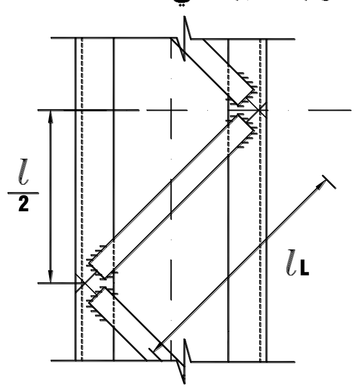
الجدول (4-4)

* الطول الفعّال : $L_{Ex} = 0.85\,L = 0.85 \text{ x } 800 = 680\ cm$

$L_{Ey} = 1.0\,L = 800\ cm$

* مقطع المجراية ليس نحيفاً لأن :

الجدول (2-2)	$b/T = 76.2/11.2 = 6.8 < 15\,\varepsilon = 15 \text{ x } 1 = 15$ $d/t = 152.2/7.1 = 21.5 < 39\varepsilon = 39$
	* عزم عطالة المقطع المجمع ونصف قطر عطالته حول المحور y $I'_y = 2\left[I_y + A\left(300 \text{ x } 10^{-1}/2 - 2.13\right)^2\right]$ $I'_y = 2\left[151 + 30.3\left(15 - 2.13\right)^2\right] = 10340\ cm^2$ $r'_y = \left(I'_y / A'\right)^{1/2} = \left(10340 / 2 \text{ x } 30.3\right)^{1/2} = 13.1\,cm$
	* نسبة نحافة المقطع المجمع : $\lambda_x = L_{Ex}/r_x = 680/8.02 = 84.8 < 180$ $\lambda_y = L_{Ey}/r'_y = 800/13.1 = 61.1 < 180$
الجدول (4-3c)	بالعودة إلى الجدول (2-4) نجد أنه لتحديد مقاومة الضغط p_c حول أي من المحورين لا بد من استخدام الجدول (4-3c) . مع أخذ $\lambda_{max} = \lambda_x = 84.8$ فنجد $p_c = 152\ N/mm^2$
	* وعليه تحدد قوة تحمل العمود المركب وفق العلاقة :
العلاقة (4-1)	$P_c = A_g\,p_c = 2 \text{ x } 30.3 \text{ x } 100 \text{ x } 152 \text{ x } 10^{-3} = 921\,kN > 910 \quad o.k.$
	* كجملة تربيط سنستخدم قضبان مبسطة ذات مقطع *40*x*8 mm* تميل على محور العمود زاوية 45° وبالأبعاد الأولية المبينة في الشكل أدناه :



$l = 2X260 = 520\ mm$

$l_l = 260\sqrt{2} = 368\ mm$

* يجب أن لا تزيد نسبة نحافة أي من المجرايتين بين نقطتي تربيط متتاليتين عليها على *50*

$$\lambda_c = l / r_y = 2 \text{ x } 260 \text{ x} 10^{-1} / 2.23 = 23.3 < 50 \qquad o.k.$$

* يجب أن لا تقل نسبة النحافة العظمى للعمود عن

$$1.4\,\lambda_c = 1.4 \text{ x } 23.3 = 32.6 < \lambda_{\max} = \lambda_x = 84.450 \qquad o.k.$$

* يجب أن لا تزيد نسبة نحافة قضيب التربيط على *180*

طول قضيب التربيط : $l_L = 260\sqrt{2} = 368\ mm$

وعليه طوله الفعّال : $l_{LE} = 1.0 l_L = 368\ mm$

نصف قطر عطالة قضيب التربيط الأصغري :

$$r_L = t / \sqrt{12} = 8 / \sqrt{12} = 2.31\ mm$$

نسبة نحافة قضيب التربيط

$$\lambda_L = l_{LE} / r_L = 368 / 2.31 = 159 < 180 \qquad o.k.$$

* يجب أن يتحمل قضيب التربيط قوة محورية ناتجة عن قص عرضي مقدار *2.5 %* من قوة الضغط المطبقة على العمود F_c أي :

$$F_L = (0.025\, F_c / n) Cos\alpha$$

حيث : $n = 2$ عدد شبكات التربيط الواقعة في مستويات متوازية.

$\alpha = 45^\circ$ زاوية ميل قضبان التربيط على محور العمود.

إذاً : $F_L = (0.025 \text{ x } 910 / 2) Cos 45 = 16.1\ kN$

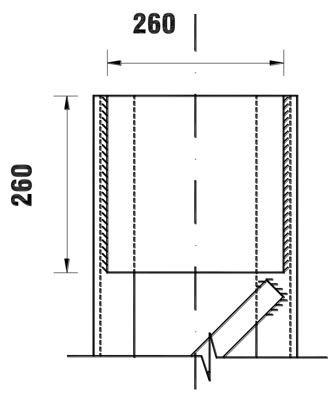
الجدول (2-1)

* بما أن سماكة قضبان الربط $T = 8\ mm$ فإن: $p_y = 275\ N / mm^2$

* بالعودة إلى الجدول (2-4) نجد أنه لتحديد مقاومة الضغط p_c يجب أن نستخدم الجدول (4-3b) مع p_y و λ_L فنجد:

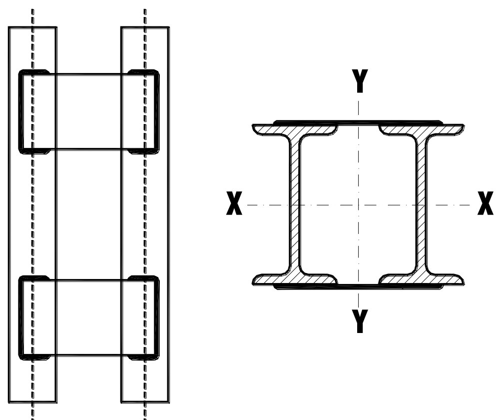
الجدول (4-3b)

$$p_c = 67\ N / mm^2$$

العلاقة (4-1)	• بناءً على ما تقدم تحسب قوة تحمل قضيب الربط على الضغط وفق العلاقة: $P_c = A_g\, p_c = 40 \text{ x } 8 \text{ x } 67 \text{ x } 10^{-3} = 21.4\, kN > F_L = 16.1\, kN$ • يجب تزويد العمود عند نهايتي جملة التربيط بمستوى تدعيم عمودي على محور العمود يتألف من قضبان متصالبة أو عوارض. وسنستخدم في المثال عوارض كما هو مبين في الشكل أدناه وسنقوم بتصميم هذه العوارض كما في المثال (3-7). 

3 - 7 الأعمدة المدعمة بعوارض Battened struts:

بيّنّاً في الفقرة السابقة طريقة لجعل مجموعة من المقاطع لتعمل مع بعضها كعنصر واحد. وسنبين في هذه الفقرة طريقة أخرى لتجميع مجموعة من المقاطع أيضاً لتقوم بنفس العمل وذلك بربطها بعوارض فولاذية – صفائح أو مقاطع – متعامدة مع محور العمود كما هو مبين في الشكل (7-2)



الشكل (7-2) عمود مدعّم بعوارض

ولكي يعمل عمود مدعّم كعنصر واحد لا بد من تحقيق الشروط التالية:

1 – يتم تقييد العناصر الرئيسية المكونة للعمود بشكل فعّال ضد التحنيب بجملة من العوارض مؤلفة من صفائح أو مقاطع وبحيث تُشكل مع العناصر الرئيسية إطاراً ذا عقد صلبة. تثبت العوارض على العناصر الرئيسية كأزواج متقابلة على وجهي العمود بدءاً من نهايته وعلى مسافات متساوية على طوله.

2- يجب أن لا تزيد نسبة النحافة العظمى λ_c للعناصر الرئيسية المكونة للعمود عن 50 على أن يؤخذ الطول الفعّال مساوياً للمسافة بين محوري عارضتين متتاليتين وأن يؤخذ نصف قطر العطالة الأصغر للعنصر. ويجب أن لا تقل نسبة نحافة العمود العظمى λ_b عن $1.4\lambda_c$ على أن تحسب λ_b وفق العلاقة التالية :

$$\lambda_b = \left(\lambda_m^2 + \lambda_c^2\right)^{1/2}$$

حيث :

λ_m هي نسبة نحافة العمود حول المحور المتعامد مع المدعّمات.

3 - يجب أن لا تقل سماكة العارضة المشكّلة من صفيحة عن 1/50 من المسافة بين اللحامين الطرفيين المثبتين لها، ويجب أن لا تزيد نسبة نحافة المقاطع المستعملة كعوارض عن 180

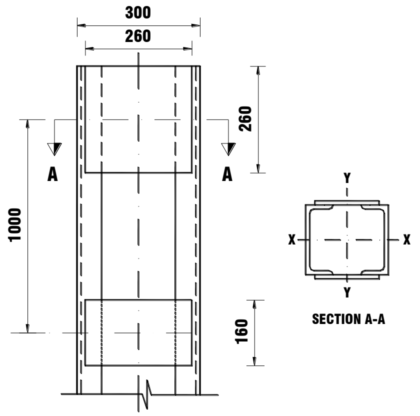
4 - يجب أن لا يقل عرض المدعّمة الطرفية (الموازي لمحور العمود) عن المسافة بين محوري المقطعين المشكلين للعمود أو عن ضعف عرض جناح المقطع الأصغر.

5 - يجب أن لا يقل عرض المدعّمة الداخلية (الموازي لمحور العمود) عن نصف المسافة بين محوري المقطعين المشكلين للعمود أو عن ضعف عرض جناح المقطع الأصغر.

6 - تصمم العوارض ووصلاتها مع العناصر الرئيسية لتتحمل القوى والعزوم الناتجة عن قص عرضي في أي نقطة من طول العمود مساوٍ إلى 2.5 % من القوة الضاغطة المحورية المصعّدة في العمود. ويضاف إلى القوة القاصّة السابقة قوة القص الناتجة عن عزم الانعطاف إذا كان العمود خاضعاً لعزم انعطاف ناتج عن لامركزية أو عزم مطبق أو قوى جانبية.

مثال : (7-3)

صمم العمود المدروس في المثال (7-2) كعمود مدعّم بعوارض كما في الشكل المبين أدناه:



<u>الحـــــل :</u>

* سنختار من جداول المقاطع الفولاذية مجرايتين قياس *203* x *76* كما في المثال (7-2) :

أن : وجدنا في المثال (7-2)*

$p_y = 275\ N/mm^2\ ,\ \varepsilon = 1.0\ ,\ L_{Ex} = 680\ cm\ ,\ L_{Ey} = 800\ cm$

$I'_y = 10340\ cm^2\ ,\ r'_y = 13.1\,cm,\ \lambda_x = 84.8\,cm,\ \lambda'_y = 61.1$

$p_c = 152\ \ N/mm^2\ \ ,\ P_c = 921\,kN$

* لتأمين العمل المشترك لعناصر العمود نستخدم نظام تدعيم بعوارض فولاذية ذات مقطع $160 \times 6\,mm$ كل $100\,cm$ مع عارضتين طرفيتين مقطع كل منهما *260* x *6 mm*

* يجب أن لا تزيد نسبة نحافة أي من المجراتين بين مركزي عارضتين متتاليتين عن 50 أي: $\lambda_c = l/r_y = 100/2.23 = 44.8\ <\ 50 \quad o.k.$

* يجب أن لا تقل نسبة نحافة العمود العظمى λ_b عن $1.4\lambda_c$ حيث :

$\lambda_b = \left(\lambda_m^2 + \lambda_c^2\right)^{1/2}$

$\lambda_m = \lambda'_y = 61.1$

$\lambda_b = \left(61.1^2 + 44.8^2\right)^{1/2} = 75.8 \geq 1.4\lambda_c = 1.4 \text{ x } 44.8 = 62.7$

* بما أن $\lambda_x = 84.8 > \lambda_b = 75.8$ فإن التحنيب حول المحور x سيكون مسيطراً.

* يجب أن لا تقل سماكة العارضة عن 1/50 من المسافة بين اللحامين المثبتين لها أي: $t \geq 260/50 = 5.2\, mm$

* كما يجب أن لا تزيد نسبة نحافة العارضة عن 180 أي:

$\lambda = L_E / r \leq 180 \;,\; r = t/\sqrt{12}$

ومنه : $t/\sqrt{12} \geq L_E /180 \Rightarrow t \geq L_E \sqrt{12}/180$

أو : $t \geq 260\sqrt{12}/180 = 5\, mm$

* إذا سماكة العوارض المختارة $6\ mm$ كافية ومحققة للشرطين السابقين

* يجب أن لا يقل عرض العارضة الداخلية b عن نصف المسافة بين محوري المجرايتين المشكلتين للعمود ، وأن لا يقل عن ضعف عرض جناح المجراية. أي : $b \geq 0.5\,(300 - 2 \text{ x } 2.13 \text{ x } 10) = 129\ mm$

و $b \geq 2 \text{ x } 76.2 = 152\ mm$

إذاً : سنختار $b = 160\ mm$

* يجب أن لا يقل عرض العارضة الطرفية b_E عن المسافة بين محوري المجراتين المشكلتين للعمود، وأن لا يقل عن ضعف عرض جناح المجراية

أي : $b_E \geq 300 - 2 \text{ x } 2.13 \text{ x } 10 = 257\ mm$

و $b_E \geq 2 \text{ x } 76.2 = 152\ mm$

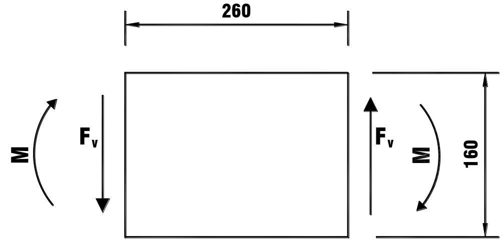
إذاً سنختار $b_E = 260 mm$

* تصمم العوارض الوسطية لتتحمل القوى والعزوم الناجمة عن قص

عرضي في أية نقطة من طول العمود مساوٍ %2.5 من القوة المحورية المصعدة المطبقة على العمود. إذاً:

- القص العرضي $F_q = 0.025 F_c = 0.025 \text{ x } 910 = 22.8 \ kN$

- القوة القاصة والعزم الناتجين عن القص F_q مبينان في الشكل أدناه:



$$F_v = F_q \, l / na \quad , \quad M = F_q \, l / 2n$$

حيث : $l = 1000 \ mm$ المسافة بين محاور العوارض المتتالية

$a = 260 \ mm$ طول العارضة

$n = 2$ عدد مستويات العوارض

إذاً $F_v = 22.8 \text{ x} 1000 / 2 \text{ x } 260 = 43.8 \, kN$

$$M = 22.8 \text{ x } 1/2 \text{ x } 2 = 5.7 \, kNm$$

- تحدد طاقة تحمل القص وفق العلاقة

العلاقة (5-1) الفقرة (5-2)

$$\left. \begin{aligned} P_v &= 0.6 \ p_y \ A_v \\ A_v &= 0.9 \text{ A} = 0.9 \text{ x } 6 \text{ x } 160 \\ &= 864 \ mm^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} P_v &= 0.6 \text{ x } 275 \text{ x } 864 \text{ x } 10^{-3} \\ &= 143 \ \ kN \ \geq F_v \qquad o.k. \end{aligned}$$

$$F_v < 0.6 P_v$$

- تحدد طاقة تحمل العزم وفق العلاقة

العلاقة (5-2)

$$M_c = p_y \ S \leq 1.2 \ p_y \ Z$$

بما أن مقطع العارضة العرضي مستطيل فإن $1.2 \, Z < S$ لذلك تحدد

طاقة تحمل العزم وفق العلاقة التالية:

$$\left.\begin{array}{l} M_c = 1.2\, p_y\, Z \\ Z = 6 \text{ x } 160^2 / 6 = 25600\ mm^3 \end{array}\right\} \Rightarrow \begin{array}{l} M_c = 1.2 \text{ x } 275 \text{ x } 256000 \text{ x } 10^{-6} \\ = 8.4\ kNNm > M = 5.7\ kNm o.k \end{array}$$

– تحقيق تحنيب الفتل الجانبي:

تحدد نسبة النحافة المكافئة للعارضة وفقاً للعلاقة التالية:

الفقرة (B.2-7 BS5950)

$$\lambda_{LT} = n \text{ x } 2.8\,(L_E\ d / T^2)^{1/2}$$

حيث: L_E الطول الفعال للعارضة $L_E = 0.85 \text{ x } 260 = 221\ mm$

d ارتفاع مقطع العارضة $d = b = 160\ mm$

t سماكة العارضة $t = 6\ mm$

الجدول (5-5)

n معامل تصحيح النحافة $n = 1.0$

$$\lambda_{LT} = 1 \text{ x } 2.8 \text{ x } (221 \text{ x } 160/6^2)^{1/2} = 87.8$$

تحدد مقاومة الانعطاف p_b من الجدول (5-10) بدلالة λ_{LT} و p_y

فنجد: $p_b = 148.4\ N/mm^2$

وعليه يحدد العزم المقاوم لتحنيب الفتل الجانبي للعارضة وفق العلاقة

$$M_b = p_b\, S = 148.4 \text{ x } 6 \text{ x } 160^2 \text{ x } 10^{-3} / 4 = 5.7\ \ kNm$$

– يحدد معامل عزم الانعطاف المنتظم المكافئ من الجدول (5-9) بدلالة $(\beta = -1.0)$ لأن العزمين المطبقين على العارضة متساويان وبالاتجاه نفسه فنجد $m = 0.43$

$$\overline{M} = m\, M_A = 0.43 \text{ x } 5.7 = 2.5\ \ kNm < M_b \qquad o.k.$$

الفصل الثامن

العناصر المعرضة للضغط والانعطاف

1 – 8 مقدمـــــة

لقد تناولنا في الفصلين الرابع والخامس تصميم العناصر المعرضة للضغط البسيط والانعطاف بشكل منفصل، وقلما توجد في الحياة العملية أي من هاتين الحالتين دون الأخرى، حيث يترافق الضغط مع العزم نتيجة إما لامركزية الوصلات التي تؤدي إلى نقل الأحمال بشكل غير مركزي أو نتيجة العزوم المنتقلة عبر العقد الصلبة أو المنتقلة نتيجة استمرار العناصر. كمثال يبين الشكل (8-1) أنواع الأحمال التي يتعرض لها عادة عمود في مبنى صناعي

حيث :

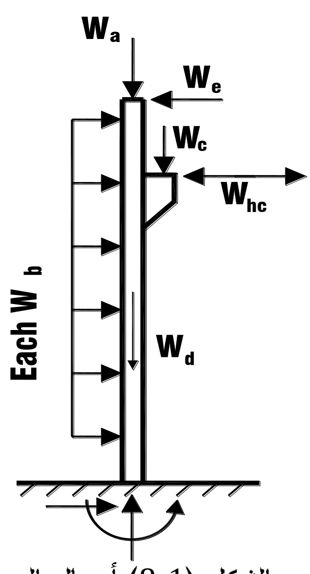
W_a الحمل الشاقولي المنقول مركزياً من سقف الهيكل الإنشائي.

W_b الحمل الأفقي الناجم عن الرياح والذي ينتقل عبر سكك الجدران

W_c و W_{hc} حملي الرافعة ويطبقان لا مركزياً عبر ظفر الرافعة.

W_d الوزن الذاتي للعمود والتغطية

W_e الحمل الأفقي المنقول من الهيكل الإنشائي للسقف



الشكل (8-1) أحمال العمود

يجب تحقيق طاقة تحمل العنصر المضغوط والمعرض إلى عزم موضعياً في نقاط العزم الأعظمي حيث تُسقف طاقة تحمل العنصر إما بوصوله إلى مرحلة السيلان أو بحدوث تحنيب موضعي وذلك وفقاً لخصائص المقطع، كما يجب تحقيق العنصر على التحنيب الكلي.

8 – 2 تحقيق طاقة تحمّل العنصر موضعيا Local capacity check

يجب أن تحقق القوى والعزوم المطبقة علاقة الترابط التالية:

$$\frac{F}{A_g p_y} + \frac{M_x}{M_{cx}} + \frac{M_y}{M_{cy}} \leq 1 \qquad (8\text{-}1)$$

حيث: F قوة الضغط المحورية المطبقة على العنصر

M_x و M_y عزمي الانعطاف المطبقين حول المحورين x و y على الترتيب.

A_g مساحة مقطع العنصر الكلية.

p_y المقاومة التصميمية وفق الجدول (2-1)

M_{cx} طاقة تحمل العزم حول المحور x وتحدد وفقاً للفقرة (5-3)

M_{cy} طاقة تحمل العزم حول المحور y وتحدد وفقاً للفقرة (5-3)

8 – 3 تحقيق التحنيب الكلي Overall buckling check

لتجنب حدوث تحنيب كلي للعنصر يجب أن تحقق العزوم والقوى المطبقة علاقة الترابط التالية:

$$\frac{F}{A_g p_c} + \frac{mM_x}{M_b} + \frac{mM_y}{p_y Z_y} \leq 1 \qquad (8\text{-}2)$$

حيث: p_c مقاومة الضغط وتحدد من الجد اول (4-3) وفقاً لنسبة نحافة العنصر λ ومقاومته التصميمية P_y

m معامل العزم المنتظم المكافئ ويحدد من الجدول (5-5) بالإضافة إلى الجدولين (5-8,9).

M_b العزم المقاوم لتحنيب الفتل الجانبي ويحدد بالعلاقة (5-6)

Z_y معامل المقطع المرن حول المحور الضعيف

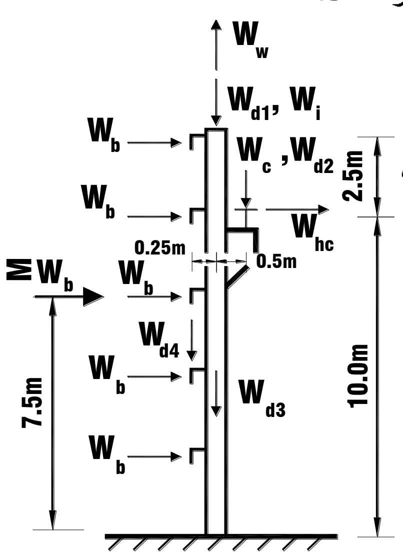
4 – 8 العناصر الخاضعة لانعطاف مركب Members with biaxial Moments

تصمم العناصر الخاضعة لانعطاف مركب وبدون وجود قوة ضغط محورية لتحقق مضمون الفقرتين السابقتين مع تعويض القو ة F بالصفر في كلا العلاقتين (8-1,2).

مثال : (8-1)

صمم العمود المبين في الشكل أدناه من فولاذ ماركته 43

علماً أن الحمولات المطبقة هي كما يلي:



الأحمال الميتة:

$W_{d1} = 50\,kN$ رد الفعل الميت للجائز الشبكي

$W_{d2} = 20\ kN$ الوزن الذاتي لجائز الرافعة

$W_{d3} = 10\ kN$ الوزن الذاتي للعمود

$W_{d4} = 16\ kN$ الوزن الذاتي لتغطية الجدار

$\Sigma W_d = 96\ kN$ مجموع الأحمال الميتة

الأحمال الحية:

$W_i = 78\ kN$ رد الفعل الحي للجائز الشبكي

أحمال الرياح:

$W_w = -90\ kN$ رد فعل الجائز الشبكي (شد)

$W_b = 11\ kN$ رد فعل سكة الجدار

$\Sigma W_b = 55\ kN$ حاصلة رد فعل سكك الجدران

أحمال الرافعة : شاملةً الفعل الديناميكي

$W_c = 220\ kN$ حمل الرافعة الشاقولي

$W_{ch} = 6\ kN$ حمل فرملة الرافعة (أفقي)

بالعودة إلى الجدول (2-1) نجد أنه لا بد من تحقيق العمود على مجموعة من حالات التحميل:

العزم $(kN.m)\ \mathrm{M}_x$	القوة الناظمية $(kN)\ \mathrm{F}$	حالة التحميل
$1.4 \times (W_{d2} \times 0.5 - W_{d4} \times 0.25)$ $= 8.4$	$1.4\Sigma W_d + 1.6 W_i$ $= 259.2$	1
$1.0 \times (W_{d2} \times 0.5 - W_{d4} \times 0.25)$ $+ 1.4 \times 7.5 \times \Sigma W_b = 583.5$	$1 \times \Sigma W_d + 1.4 W_w$ $= -30$	2
$1.4 \times (W_{d2} \times 0.5 - W_{d4} \times 0.25)$ $+ 1.6 W_c \times 0.5 = 184.4$	$1.4\Sigma W_d + 1.6 W_c$ $= 486.4$	3
$1.4\ (W_{d2} \times 0.5 - W_{d4} \times 0.25)$ $+ 1.4 W_c \times 0.5 + 1.4 W_{ch} \times 10$ $= 246.4$	$1.4\Sigma W_d + 1.4 W_c$ $= 442.4$	4
$1.2 (W_{d2} \times 0.5 - W_{d4} \times 0.25)$ $+ 1.6 W_c \times 0.5 = 183.2$	$1.2\Sigma W_d + 1.6 W_i + 1.6 W_c$ $= 592$	5
$1.2 (W_{d2} \times 0.5 - W_{d4} \times 0.25)$ $+ 1.4 (W_c \times 0.5 + W_{ch} \times 10)$ $= 245.2$	$1.2\Sigma W_d + 1.6 W_i + 1.4 W_c$ $= 548$	6

7	$1.2\Sigma W_d + 1.2W_i + 1.2W_w = 100.8$	$1.2(W_{d2} \text{ x } 0.5 - W_{d4} \text{ x } 0.25) + 1.2 \text{ x } 7.5 \text{ x } \Sigma W_b = 502.2$
8	$1.2\Sigma Wd + 1.2W_c + 1.2W_w = 271.2$	$1.2(W_{d2} \text{ x } 0.5 - W_{d4} \text{ x } 0.25) + 1.2W_c \text{ x } 0.5 + 1.2 \text{ x } 7.5 \text{ x } \Sigma W_b = 634.2$
9	$1.2\Sigma W_d + 1.2W_i + 1.2W_c + 1.2W_w = 364.8$	$1.2(W_{d2} \text{ x } 0.5 - W_{d4} \text{ x } 0.25) + 1.2W_c \text{ x } 0.5 + 1.2 \text{ x } 7.5 \text{ x } \Sigma W_b = 634.2$

* لنجرب مقطع العمود $356 \text{ x } 368 \text{ x } 177\, UC$ ذا الخواص التالية:

$$B = 372.6\, mm \;,\; T = 23.8\, mm \;,\; D = 368.2\, mm$$

$$d = 290.2\, mm \;,\; t = 14.4\, mm \;,\; A_g = 226\, cm^2$$

$$r_x = 15.9\, cm \;,\; r_y = 9.54\, cm \;,\; S_x = 3460\, cm^3$$

- بما أن $T = 23.8\, mm$ فإن $p_y = 265\, N/mm^2$ حسب الجدول (2-1)

$$\varepsilon = (275/p_y)^{1/2} = 1.02$$

- بالعودة للجدول (2-2) نجد أن المقطع لدن لأن :

$$b/T = 372.6 \text{ x } 0.5/23.8 = 7.83 < 8.5\,\varepsilon = 8.67$$

$$d/t = 290.2/14.4 = 20.2 < 79\,\varepsilon = 80.58$$

إذاً لا حاجة لتخفيض المقاومة التصميمية p_y لأن المقطع ليس نحيفاً

* تحقيق طاقة تحمل العمود موضعياً:

نظراً لأن المقطع لدن، تُحدد طاقة تحمل العزم حول المحور x بالعلاقة (2-5):

$$M_{cx} = p_y S_x = 265 \text{ x } 3460 \text{ x } 10^{-3} = 917\, kNm$$

لتحقيق طاقة تحمل العمود موضعياً في أسفله (نقطة حدوث العزم الأعظمي) لا بد من تحقيق علاقة الترابط (8-1):

$$\frac{F}{A_g p_y} + \frac{M_x}{M_{cx}} \le 1$$

وذلك من أجل حالات التحميل الخطرة وللتوضيح سنقوم بتحقيق كل حالات التحميل:

حالة التحميل	$F\ (kN)$	$M_x\ (kNm)$	$F/A_g p_y + M_x/M_{cx}$
1	259.2	8.4	0.05
2	-30	583.5	0.64
3	486.4	184.4	0.28
4	442.4	246.4	0.34
5	592	183.2	0.3
6	548	245.2	0.36
7	100.8	502.2	0.56
8	271.2	634.2	0.74
9	364.8	634.2	0.75

إذاً علاقة الترابط محققة في كل حالات التحميل وطاقة تحمل العنصر محققة موضعياً

* تحقيق التحنيب الكلي:

– بالعودة إلى الشكل (7-4) نحدد الطول الفعال حول كل من المحورين الرئيسيين للمقطع وبالتالي نسبة نحافته.

$$L_{Ex} = 1.5 \text{ x } L = 1.5 \text{ x } 12.5 = 18.75\ m$$

$$\lambda_x = L_{Ex} / r_x = 18.75 \text{ x } 100 / 15.9 = 118$$

$$L_{Ey} = 0.85 \text{ x } L_1 = 0.85 \text{ x } 10.0 = 8.5\ m$$

$$\lambda_y = L_{Ey} / r_y = 8.5 \text{ x } 100 / 9.54 = 89$$

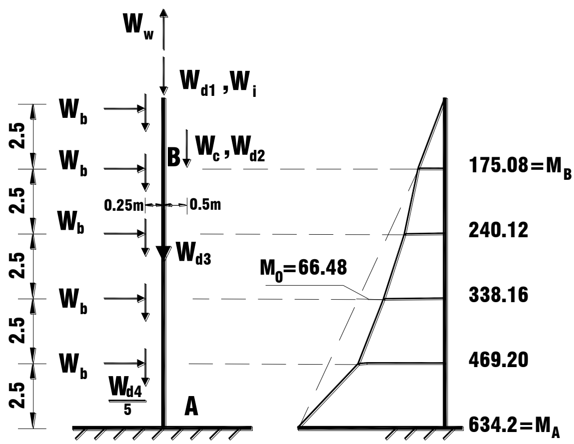
– بالعودة إلى الجدول (2-4) نجد أنه يجب استخدام الجدولين (4-3b) و (4-3c) لاستخراج مقاومة الضغط حول المحورين x و y على الترتيب

$$p_y = 265\ N/mm^2\ ,\ \lambda_x = 118 \Rightarrow p_{cx} = 109\ N/mm^2$$

$$p_y = 265\ N/mm^2\ ,\ \lambda_y = 89 \Rightarrow p_{cy} = 141\ N/mm^2$$

إذاً: $p_c = p_{cx} = 109\ N/mm^2$

- من الواضح أن أخطر حالات تراكب الأحمال هي الحالة (9) لذلك سنحقق جزء العمود الواقع بين أساسه والجائز الحامل للرافعة على تحنيب الفتل الجانبي.



- يعتمد العزم المقاوم لتحنيب الفتل الجانبي M_b دائماً على نسبة النحافة حول المحور الضعيف، وباعتبار أن الجناح المضغوط مقيد جانباً في موقعه عند طرفي الجزء المدروس (A B) وأن كلا الجناحين عند (B) غير ممنوعين تماماً من الدوران فإن الطول الفعال لهذا الجزء يحدد وفقاً للجدول (5-2) كمايلي:

$L_{Ey} = 0.85 L_1 = 0.85 \text{ x } 10 = 8.5\, m$

$\lambda = L_{Ey} / r_y = 8.5 \text{ x } 100 / 9.54 = 89$

- مؤشر الفتل: $x = D/T = 368.2/23.8 = 15.5$

- معامل التحنيب: $u = 0.9$

- يحدد عامل النحافة (v) من الجدول (5-4) بدلالة $\lambda / x = 5.93$

والمعامل $N = 0.5$ فنجد : $v = 0.78$

- يحدد معامل العزم المكافئ (m) من الجدول (5-5) باعتبار أن مقطع العنصر

متساوي الجناحين وأن الجزء المدروس محمل بقوى بين طرفيه ولا تسبب عدم استقراره، إذاً : $m = 1.0$

- يحدد معامل تصحيح النحافة (n) من الجدول (5-7) بدلالة كل من :

$\beta = M_B / M_A = 175.08 / 634.2 = 0.276$

$\gamma = -M_A / M_o = -634.2 / 66.48 = -9.5$

$n = 0.71$

تحدد نسبة النحافة المكافئة λ_{LT} وفق العلاقة (5-7) كمايلي:

$\lambda_{LT} = n\, u\, v \lambda = 0.71 \text{ x } 0.9 \text{ x } 0.78 \text{ x } 89 = 44.3$

- تحدد مقاومة الانعطاف p_b بالعودة إلى الجدول (5-10) وبدلالة p_y و λ_{LT} فنجد : $p_b = 242\ N / mm^2$

- يحدد العزم المقاوم لتحنيب الفتل الجانبي M_b وفق العلاقة (5-6) كمايلي:

$M_b = p_b\, S_x = 242 \text{ x } 3460 \text{ x } 10^{-3} = 837.32\ kNm$

- بتطبيق علاقة الترابط (8-2) نجد

$$\frac{F}{A_g\, p_c} + \frac{m\, M_x}{M_b} = \frac{364.8 \text{ x } 10^3}{226 \text{ x } 100 \text{ x } 109} + \frac{1.0 \text{ x } 634.2}{837.32} = 0.9 < 1 \quad o.k.$$

إذا العمود محقق على التحنيب الكلي والمقطع المختار مقبول.

الفصل التاسع

الجائز الحامل للرافعة

Crane Girder

١ ٩ مقدمـــــة

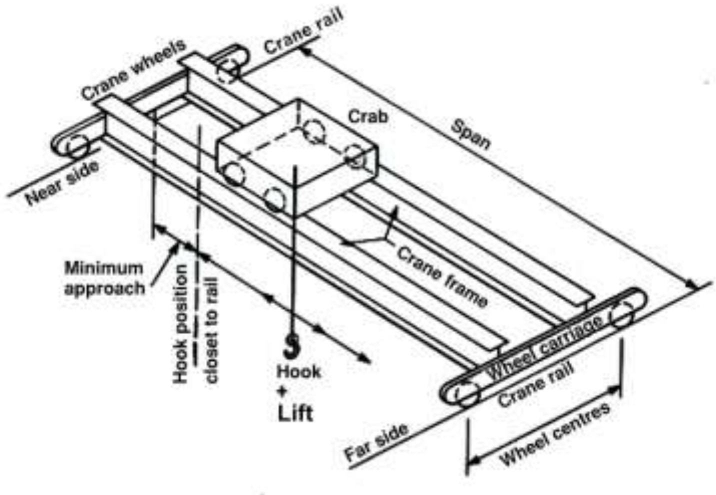
تحتوي الأبنية الصناعية عادةً على خطوط إنتاج تتطلب رفع وتحريك أحمال ثقيلة أثناء العمليات التصنيعية أو الصيانة، وتعد الروافع الجسرية الوسيلة الأفضل للقيام بذلك مغطية الجزء الأكبر من مساحة البناء. تستند هذه الروافع على أربعة دواليب تتحرك على سكة محمولة على جائز كالمبين في الشكل (9-1) يدعى بالجائز الحامل للرافعة، كما يُبين الشكل (9-2) الأجزاء الرئيسية لرافعة جسرية.



الشكل (9-1) جائز حامل للرافعة

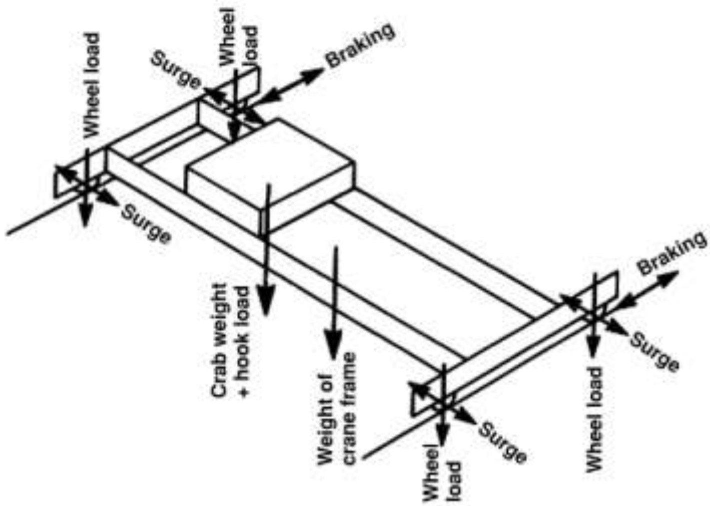
يتم حساب حمل الدولاب الواحد من خلال المعطيات التي يقدمها مصنّعي الروافع عن وزن كل جزء منها مع الانتباه إلى أن العربة والخطاف يمكن أن يتحركا على طول إطار الرافعة حتى يصلا إلى مسافة دنيا من الجائز الحامل للرافعة تسمى مسافة الاقتراب الأدنى، وعلى هذا الأساس يجب حساب حمل الدولابين ال قريبين إلى الجائز الحامل للرافعة إضافة إلى وزن إطار الرافعة الذي يقسم بالتساوي على أربعة دواليب. يصعد حمل الدولاب الواحد بـــ 25% لأخذ الأثر الديناميكي الناتج عن حركة الرافعة بالحسبان وذلك للرافعات الصغيرة والمتوسطة، أما في

حالة الرافعات العملاقة لا بد من العودة إلى المواصفات البريطانية BS 2573 .
إضافة إلى الحمل الشاقولي هناك حملين أفقيين يُنقَلان عبر السكة إلى الجائز:
الأول حمل جانبي متعامد مع السكة ينتج عن حركة وفرملة العربة على طول إطار الرافعة ويقدر بـــ 10% من وزن العربة وحمل الخطاف، ويقسم عادة على أربعة دواليب ويؤثر في أي من الاتجاهين؛ أما الحمل الأفقي الثاني فينتج عن فرملة الرافعة ككل ويُطبَّق على طول السكة ويقدر بـــ 5% من حمل الدواليب ويكون أعظمياً عندما يكون حمل الدواليب أعظمياً، إضافة إلى كل هذه الأحمال يجب أن لا ننسى الوزن الذاتي للجائز الحامل للرافعة ذاته. ويوضح الشكل (9-3) هذه الأحمال



الشكل (9-2) أجزاء الرافعة الجسرية

عند تصميم الجائز الحامل لرافعة وفقاً للحالة الحدية القصوى، يؤخذ عامل الأمان γ_f مساوياً 1.6 على الأحمال الحية الشاقولية ويؤخذ مساوياً 1.4 عند اعتبار تأثير الحملين الحيين الشاقولي والأفقي معاً.



الشكل (9-3) أحمال الرافعة

9-2 آثار الحمل الأعظمي Maximum load effects

يتغير عزم الانعطاف وقوة القص الناتجين عن حملي الدولابين في الجائز الحامل للرافعة بتغير موقع الدولابين على طول الجائز، ففي الجائز ذي الاستناد البسيط يحصل القص الأعظمي بجانب المسند مباشرةً، أما عزم الانعطاف الأعظمي يحصل بالقرب من منتصف الجائز وبشكل عام لا بد من استخدام خطوط التأثير لإيجاد مواقع الأحمال التي تنتج القص وعزم الانعطاف الأعظمين. ويبين الشكل (9-4) مواقع حملي الدولابين وعزم الانعطاف وقوة القص الأعظمين لجائز بسيط حيث تحدد القيم العظمى وفق العلاقات التالية:

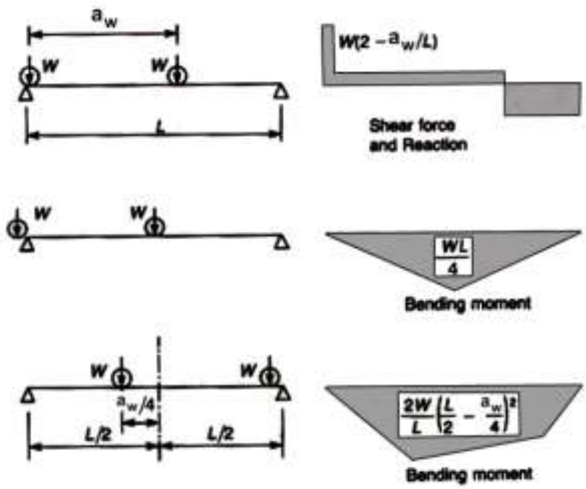
قوة القص العظمى $$F_{\max} = W(2 - a_w / L) \qquad (9\text{-}1)$$

عزم الانعطاف الأعظمي $M_{max} = W\,L/4$ (9-2)

or $M_{max} = 2W\,(L/2 - a_w/4)^2/L$ (9-3)

رد الفعل الأعظمي $R_{max} = W(2 - a_w/L)$ (9-4)

حيث تمثل W حمل الدولاب.



الشكل (4-9) عزم الانعطاف وقوة القص الأعظميين

9-3 تصميم الجائز الحامل للرافعة

يتم تصميم الجائز الحامل للرافعة كعنصر منعطف كما جاء في الفصل الخامس ولكن مع الأخذ بالحسبان النقاط التالية:

* يُهمَل تأثير تغير العزم على طول المجاز فيصبح معامل تصحيح النحافة n ومعامل العزم المنتظم المكافئ m مساويين إلى الواحد (m = n = 1) وتصبح عندها العلاقة (5-7) المحددة لنسبة النحافة المكافئة كما يلي:

$\lambda_{LT} = uv\lambda$ (9-5)

* يحسب مؤشر الفتل x وفقاً للفقرة B 2.5 من الكود BS 5950 أي وفق العلاقة التالية:

$$x = 0.566\, h_s\, (A/j)^{1/2} \qquad (9\text{-}6)$$

حيث: h_s المسافة بين مركزي قص الجناحين كما في الشكل (9-5)

A مساحة مقطع الجائز ويحسب بالعلاقة التالية:

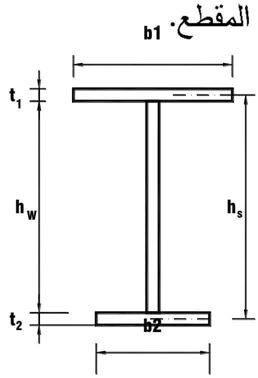
$$A = \sum b_i\, t_i + h_w\, t_w \qquad (9\text{-}7)$$

j ثابت فتل المقطع ويحسب من العلاقة التقريبية التالية:

$$j = (\sum b_i\, t_i^3 + h_w\, t_w^3)/3 \qquad (9\text{-}8)$$

t_i , b_i عرض وسماكة صفيحة الجناحين i

t_w , h_w ارتفاع وسماكة جسد المقطع.



الشكل (9-5)

* يتم حساب الضغط المحلي على جسد المقطع تحت دولاب الرافعة بتوزيع حمل الدولاب بزاوية 45° عبر السكة وجناح المقطع، فيحدد طول التحميل بالعلاقة التالية:

$$x_R = 2(H_R + T) \qquad (9\text{-}9)$$

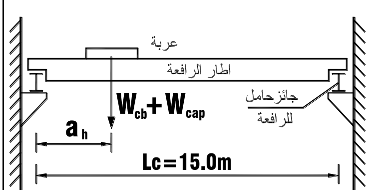
حيث: H_R ارتفاع السكة و T سماكة جناح الجائز.

* تحسب مقاومة تحنيب القص دون استخدام فعل حقل الشد.

* عند استخدام اللحام في تصنيع الجائز الحامل للرافعة يجب أن يكون اللحام مستمراً على كامل طول العناصر الملحومة.

مثال 1-9

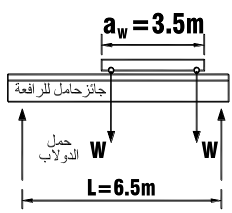
صمم جائزاً حاملاً للرافعة مجازة 6.5m من فولاذ ماركته 43 مستخدماً مقطعاً قياسياً UB مع صفيحة ملحومة إلى جناحه العلوي، بحيث يستطيع حمل رافعة جسرية متوسطة الاستطاعة مواصفاتها كمايلي:



-مجاز الرافعة $L_c = 15.0m$

-المسافة بين دولابيها $a_w = 3.5m$

-مسافة الاقتراب الأدنى $a_h = 0.7m$



-وزن إطار الرافعة $W_c = 270\,kN$

-وزن العربة $W_{cb} = 60\,kN$

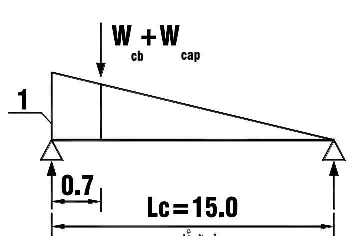
-حمل الخطاف $W_{cap} = 200\,kN$

المعامل الديناميكي يساوي 1.25

الحـــــل:

1) حساب أحمال الدولاب الواحد

* الأحمال الحية الشاقولية: بالعودة إلى خط التأثير المبين أدناه نجد:



- الحمل الناتج عن الخطاف

$W_1 = 200\,(15-0.7)\,/\,(15 \text{ x } 2) = 95.3\ kN$

- الحمل الناتج عن وزن العربة

$W_2 = 60\,(15-0.7)\,/\,(15 \text{ x } 2) = 28.6\ kN$

- الحمل الناتج عن وزن إطار الرافعة

$W_3 = 270/4 = 67.5\ kN$

- مجموع الأحمال الشاقولية العظمى على الدولاب

$W_4 = W_1 + W_2 + W_3 = 191.4\,kN$

- حمل الدولاب مصعّداً بالمعامل الديناميكي وبعامل الأمان

$\gamma_f = 1.6$

$W_{v1} = 1.25 \text{ x } 1.6 \text{ x } 191.4 = 383\ kN$

- حمل الدولاب مصعّداً بالمعامل الديناميكي وبعامل الأمان

$\gamma_f = 1.4$

$W_{v2} = 1.25 \text{ x } 1.4 \text{ x } 191.4 = 335\ kN$

* الأحمال الحية الأفقية:

- الحمل المتعامد مع السكة ويساوي % 10 من حمل الخطاف ووزن العربة مقسوماً على عدد الدواليب مصعّداً بعامل أمان

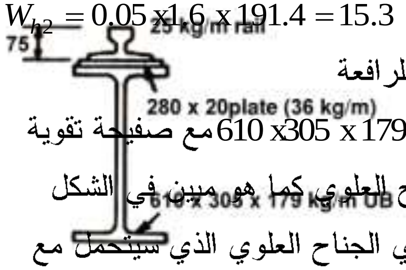
$\gamma_f = 1.4$

$W_{h1} = 1.4 \text{ x } 0.1\,(200+60)\,/4 = 9.1\ kN$

- الحمل الموازي للسكة ويساوي % 5 من حمل الدولاب الشاقولي

الأعظمي (W_4) مصعّداً بعامل أمان قدره $\gamma_f = 1.6$ أي

$$W_{h2} = 0.05 \text{ x} 1.6 \text{ x} 191.4 = 15.3 \quad kN \text{ per wheel}$$



2) اختيار مقطع الجائز الحامل للرافعة

سنجرب مقطعاً قياسياً $610 \text{ x} 305 \text{ x} 179 \;\; UB$ مع صفيحة تقوية $280 \text{ x} 20 \; mm$ على طول الجناح العلوي كما هو مبين في الشكل أدناه. تستخدم هذه الصفيحة لتقوي الجناح العلوي الذي سيتحمل مع صفيحة التقوية القوى الأفقية المتعامدة مع السكة.

يحسب الوزن الميت للجـــائز بإضافة وزن صفيحة التقوية $(0.36 \, kN/m)$ ووزن السكة ($0.25 \, kN/m$ فرضاً) إلى الوزن الذاتـــي للمقطع القياسي فينتج:

$$W_d = 1.4 \text{ x } (1.79 + 0.36 + 0.25) \text{ x } 6.5 = 21.8 \quad kN$$

3) حساب عزم الانعطاف وقوة القص

* عزم الانعطاف الأعظمي الناتج عن الأحمال الشاقولية

– عزم الانعطاف الناتج عن أحمال الدولابين عندما يُطبَّقان دون أحمال أفقية

إما $M_1 = W_{v1} L/4 = 383 \text{ x } 6.5/4 = 622.4 \quad kNm$

أو $M_2 = 2 W_{v1} (L/2 - a_w/4)^2 / L$

$$= 2 \text{ x } 383 \, (6.5/2 - 3.5/4)^2 / 6.5 = 664 \quad kNm$$

– عزم الانعطاف الناتج عن الوزن الذاتي للجائز وعن أحمال

الدولابين عندما يُطبَّقان دون أحمال أفقية

$$M_{x1} = M_2 + W_d\ L/8 = 664 + 21.8 \text{ x } 6.5/8 = 682 \quad kNm$$

– عزم الانعطاف الناتج عن أحمال الدولابين مع وجود أحمال أفقية

إما

$$M_3 = W_{v2}\ \text{L/4} = 335 \text{ x } 6.5/4 = 544 \quad kNm$$

أو

$$M_4 = 2W_{v2}\ (L/2 - a_w/4)^2 / L$$
$$= 2 \text{ x } 335\ (6.5/2 - 3.5/4)^2 / 6.5 = 581 \quad kNm$$

– عزم الانعطاف الناتج عن الوزن الذاتي للجائز وعن أحمال الدولابين مع وجود أحمال أفقية

$$M_{x2} = M_4 + W_d\ L/8 = 581 + 21.8 \text{ x } 6.5/8 = 599 \quad \text{kNm}$$

* عزم الانعطاف الأعظمي الناتج عن الأحمال الأفقية

إما

$$M_5 = W_{h1}\ \text{L/4} = 9.1 \text{ x } 6.5/4 = 14.7 \quad kNm$$

أو

$$M_6 = 2W_{h1}\ (L/2 - a_w/4)^2 / L$$
$$= 2 \text{ x } 9.1 (6.5/2 - 3.5/4)^2 / 6.5 = 15.8 \quad kNm$$

إذاً

$$M_y = M_6 = 15.8 \quad kNm$$

* القص الشاقولي الأعظمي الناتج عن الأحمال الشاقولية

– القص الشاقولي الأعظمي الناتج عن الدولابين دون وجود أحمال أفقية.

$$F_{v1} = W_{v1}(2 - a_w/L) = 383\ (2 - 3.5/6.5) = 560 \quad kN$$

– القص الشاقولي الناتج عن الوزن الذاتي و عن أحمال الدولابين عندما يُطبَّقان دون أحمال أفقية

$$F_{x1} = F_{v1} + W_d/2 = 560 + 21.8/2 = 571 \quad kN$$

– القص الشاقولي الأعظمي الناتج عن أحمال الدولابين مع وجود أحمال أفقية.

$$F_{v2} = W_{v2}(2 - a_w / L) = 335\,(2 - 3.5/6.5) = 490 \quad kN$$

- القص الشاقولي الناتج عن الوزن الذاتي للجائز و عن أحمال الدولابين مع وجود أحمال أفقية

$$F_{x2} = F_{v2} + W_d / 2 = 490 + 21.8/2 = 501 \quad kN$$

* القص الأعظمي الناتج عن الأحمال الأفقية

$$F_y = W_{h1}(2 - a_w / L) = 9.1(2 - 3.5/6.5) = 13.3 \quad kN$$

ونلخص في الجدول التالي عزم الانعطاف والقص الأعظميين

حالة التحميل	$M_x\ (kNm)$	$M_y\ (kNm)$	$F_x\ (kN)$	$F_y\ (kN)$
يعمل الحمل الشاقولي دون الحمل الأفقي	682	—	571	—
يعمل الحمل الشاقولي مع الحمل الأفقي	599	15.8	501	13.3

4) خصائص المقطع المجمع

- خصائص المقطع القياسي المستخدم 610 x 305 x 179 UB هي

$D = 620.2\ mm,\ B = 307.1\ mm,\ t = 14.1 mm,\ T = 23.6 mm,$

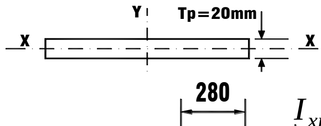
$r = 16.5 mm,\ d = 540 mm,\ A_B = 228 cm^2,\ I_{xB} = 153000\ cm^4$

$I_{yB} = 11410\ cm^4, r_x = 25.9\ cm,\ r_y = 7.07\ cm$

$Z_{xB} = 4935\ cm^3,\ Z_{yB} = 743\ cm^3,\ S_{xB} = 5547\ cm^3,$

$S_{yB} = 1144\ cm^3$

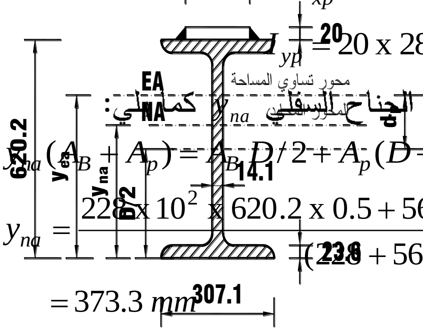
– خصائص صفيحة التقوية



$$A_P = 280 \text{ x } 20 \text{ x } 10^{-2} = 56\, cm^2$$

$$I_{xp} = 280 \text{ x } 20^3 \text{ x } 10^{-4} / 12 = 18.7\, cm^4$$

$$I_{yp} = 20 \text{ x } 280^3 \text{ x } 10^{-4} / 12 = 3658.7\, cm^4$$



– يحدد بعد المحور المحايد عن الجناح السفلي y_{na} كما يلي:

$$y_{na}(A_B + A_p) = A_B\, D/2 + A_p (D + T_p/2)$$

$$y_{na} = \frac{228 \text{ x } 10^2 \text{ x } 620.2 \text{ x } 0.5 + 56 \text{ x } 10^2 (620.2 + 20 \text{ x } 0.5)}{(228 + 56) \text{ x } 10^2}$$

$$= 373.3\, mm$$

- ومنه تحسب المسافة بين مركز ثقل المقطع القياسي والمحور المحايد

$$d_e = y_{na} - D/2$$

$$= 373.3 - 620.2 \text{ x } 0.5$$

$$= 63.2\, mm$$

- يحدد بعد محور تساوي المساحة d_p عن مركز ثقل المقطع القياسي كما يلي:

$$A_B/2 + t d_p = A_B/2 - t d_p + A_p \Rightarrow$$

$$d_p = A_p / 2t = 56 \text{ x } 10^2 / 2 \text{ x } 14.1 = 198.6\, mm$$

– ومنه يحدد بعد محور تساوي المساحة عن الجناح السفلي

$$y_{ea} = d_p + D/2 = 198.6 + 620.2 \text{ x } 0.5 = 508.7\, mm$$

– معامل المقطع اللدن حول محور تساوي المساحة

$$S_x = S_{xB} + td_p^2 + A_p(D/2 + T_p/2 - d_p)$$
$$= 5547 \text{ x } 10^3 + 14.1 \text{ x } 198.6^2 +$$
$$56 \text{ x } 100\ (620.2 \text{ x } 0.5 + 20 \text{ x } 0.5 - 198.6) = 6783\ cm^3$$

- معامل الجناح العلوي اللدن حول محوره الشاقولي

$$S_{yf} = (23.6 \text{ x } 307.1^2/4 + 20 \text{ x } 280^2/4) \text{ x } 10^{-3} = 948\ cm^3$$

- عزم عطالة المقطع المجمع ومعامله المرن حول المحور المحايد

$$I_x = I_{xB} + A_B\ d_e^2 + I_{xp} + A_p(D + T_p/2 - y_{na})$$
$$I_x = 153000 \text{ x } 10^4 + 228 \text{ x } 10^2 \text{ x } 63.2^2 + 18.7 \text{ x } 10^4$$
$$+ 56 \text{ x } 10^2 \text{ x } (620.2 + 20 \text{ x } 0.5 - 373.3)^2 = 199084\ cm^4$$
$$Z_x = I_x / y_{na} = 199084 / 373.3 = 5333\ cm^3$$

- عزم عطالة المقطع المجمع ونصف قطر عطالته حول محور شاقولي مار بمركز ثقله

$$I_y = I_{yB} + I_{yp} = 11410 + 3658.7 = 15068.7\ cm^4$$
$$r_y = \sqrt{I_y / A} = \sqrt{15068.7 / (228 + 56)} = 7.28\ cm$$

- عزم عطالة الجناح السفلي حول المحور الشاقولي ذاته

$$I_{tf} = 23.6 \text{ x } 307.1^3 / (12 \text{ x } 10^4) = 5690\ cm^3$$

- عزم عطالة الجناح العلوي ومعامل مقطعه المرن حول المحور الشاقولي ذاته

$$I_{cf} = I_{tf} + 20 \text{ x } 280^3 / (12 \text{ x } 10^4) = 9350\ cm^3$$

$$Z_{yf} = 2I_{cf} / B = 2 \text{ x } 9350 / 30.71 = 609\ cm^3$$

5) تصنيف المقطع

- بما أن $T = 23.6\ mm$ فإن $p_y = 265\ N/mm^2$

$\varepsilon = (275/265)^{1/2} = 1.02$ و

- المقطع مدمج لأن:

$b/T = B/2T = 307.1/2 \text{ x } 23.6 = 6.5 < 9.5\,\varepsilon = 9.7$

$d/t = 540/14.1 = 38.3 < 98\,\varepsilon = 100$

الجدول (2-1) $b/T_p = 280/20 = 14 < 25\,\varepsilon = 25.5$ لصفيحة التقوية

يكفي أن نتأكد من أن المقطع مدمج لأن الجائز ذو استناد بسيط ولا يحتاج إلى طاقة دوران لدنة.

الجدول (2-2) - لا حاجة لتحقيق تحنيب القص لأن $d/t = 38.3 < 63\,\varepsilon = 64$

6) تحقيق طاقة تحمل القص

- القص الشاقولي

$$\left.\begin{aligned} P_{vx} &= 0.6\, p_y\, A_v \\ A_v &= tD \end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{aligned} P_{vx} &= 0.6 \text{ x } 265 \text{ x} 14.1 \text{ x } 620.2 \text{ x } 10^{-3} \\ P_{vx} &= 1390\; kN > F_x = 571\; kN \quad o.k \end{aligned}$$

$F_x / p_{vx} = 0.41$

- القص الأفقي

$$P_{vy} = 0.6\, p_y (B \text{ x } T + b\, T_p) = 0.6 \text{ x} 265 \left(307.1 \text{ x} 23.6 + 280 \text{ x } 20\right) \text{x } 10^{-3}$$

العلاقة (5-1) $= 2030\; kN > F_y = 13.3\; kN \quad o.k$

$F_y / p_{vy} = 0.1$

7) تحقيق طاقة تحمل العزم

- بما أن $F_x < 0.6\, P_{vx}$ تحدد طاقة تحمل العزم الشاقولي بالعلاقة:

$M_{cx} = p_y\, S_x \le 1.2\, p_y\, Z_x$

إما $M_{cx} = 265 \text{ x } 6783 \text{ x } 10^{-3} = 1797 \quad kNm$

أو $M_{cx} = 1.2 \text{ x } 265 \text{ x } 5333 = 1695 \quad kNm$

إذاً نأخذ أصغر القيمتين $M_{cx} = 1695 \quad kNm$

– عندما يكون الحمل الشاقولي مطبقاً فقط فإن

$M_{cx} = 1695 \;\; kN\,m > M_x = 682 \;\; kN\,m \qquad o.k.$

– بما أن $F_y < 0.6\,P_{vy}$ تحدد طاقة تحمل العزم الأفقي بالعلاقة:

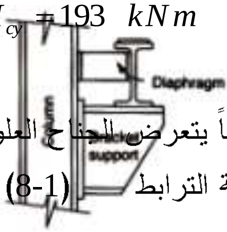
$M_{cy} = p_y\, S_{yf} \le 1.2\; p_y\, Z_{yf}$

حيث S_{yf} و Z_{yf} معاملي المقطع اللدن والمرن على الترتيب للجناح العلوي

إما $M_{cy} = 265 \text{ x } 948 \text{ x } 10^{-3} = 251 \;\; kN\,m$

أو $M_{cy} = 1.2 \text{ x } 265 \text{ x } 609 \text{ x } 10^{-3} = 193 \;\; kN\,m$ العلاقة

إذاً نأخذ أصغر القيمتين $M_{cy} = 193 \;\; kN\,m$ (5-2)



– تحقيق الانعطاف المركب

عندما تكون الأحمال الشاقولية والأفقية مطبقة معاً يتعرض الجناح العلوي إلى انعطاف مركب، لذا يجب تحقيقه وفق علاقة الترابط (8-1) مع تعويض $F = 0$ فتصبح العلاقة كما يلي:

$$\frac{M_x}{M_{cx}} + \frac{M_y}{M_{cy}} \le 1 \Rightarrow \frac{599}{1695} + \frac{15.8}{193} = 0.43 < 1 \qquad o.k.$$

8) تحقيق تحنيب الفتل الجانبي:

بما أن الجائز مــقيد في موضعه فقط عند مسنديه كما هو مبين في الشكل فإن الجناح العلوي غير مقــيد وبالتالي الجناح العلوي والحمل حران في الحركة جانبياً.

إذاً يمكن أن يكون الحمل مساعداً في عدم استقرار الجناح العلوي.

بناءً على ما تقدم وبالعودة للجدول (2-5) نحدد الطول الفعال للجائز كما يلي:

$$L_E = 1.2\,L + 2\,D$$

$$L_E = 1.2 \text{ x } 6.5 + 2\,(620.2 + 20) \text{ x } 10^{-3} = 9.08\ m$$

– نسبة النحافة

$$\lambda = L_E / r_y = 9.08 \text{ x } 10^2 / 7.28 = 125$$

– معامل التحنيب (الجدول (5-2))

$$u = 1$$

– مؤشر الفتل : يحدد وفق العلاقة

$$x = 0.566\ h_s\ (A/\ j)^{1/2}$$

(العلاقة (9-6))

$$h_s = D + T_p - T/2 - (T + T_p)/2$$

$$= 620.2 + 20 - 23.6 \text{ x } 0.5 - (23.6 + 20) \text{ x } 0.5 = 608.6\ mm$$

$$A = A_B + A_p = 228 + 56 = 284\ cm^2$$

$$j = (\Sigma\, b_i\, t_i^3 + h_w\, t_w^3)/3$$

$$j = \left[2 \text{ x } 307.1 \text{ x } 23.6^3 + 280 \text{ x } 20^3 + (620.2 - 2 \text{ x } 23.6) \text{ x } 14.1^3\right]$$

$$\text{x } 10^{-4} / 3 = 397.3\ cm^4$$

$$x = 0.566 \text{ x } 60.86\ (284/397.3)^{1/2} = 29.12$$

– يحدد معامل النحافة v من الجدول (5-4) بدلالة

فنجد:

$$v = 0.81$$

(الجدول (5-4))

– إذاً تحدد نسبة النحافة المكافئة λ_{LT} وفق العلاقة التالية (العلاقة (9-5))

– تحدد مقاومة الانعطاف p_b من الجدول (5-11) بدلالة λ_{LT} و p_y

فنجد: $p_b = 119\ N/mm^2$

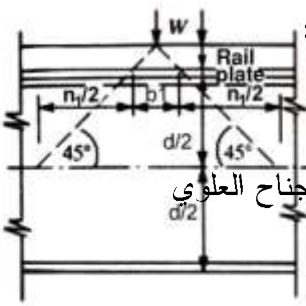
– يحدد العزم المقاوم لتحنيب الفتل الجانبي للجائز وفق العلاقة

$$M_b = p_b\ S_x = 119 \text{ x } 6783 \text{ x } 10^{-3} = 807\ \ kNm$$

– يهمل تأثير تغير العزم على طول مجاز الجائز وفقاً للفقرة (9-3) أي يؤخذ معامل العزم المنتظم المكافئ m مساوياً للواحد

– إذاً الجائز محقق ضد تحنيب الفتل الجانبي في حالة الأحمال الشاقولية دون الأفقية لأن:

كذلك الجائز محقق ضد تحنيب الفتل الجانبي في حالة تواجد الأحمال الشاقولية والأفقية معاً ونبرهن على ذلك بتطبيق العلاقة (8-2) مع حذف حد القوة المحورية لتصبح كما يلي:



حيث $Z_y = Z_{yf}$ معامل المقطع المرن للجناح العلوي

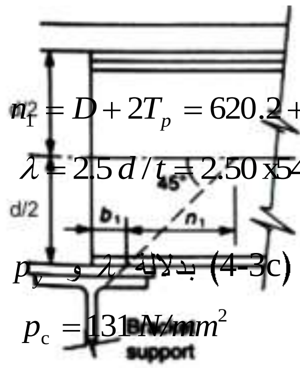
9) تحقيق تحنيب الجسد

يجب تحقيق جسد المقطع على التحنيب عند نقاط تطبيق الأحمال المركزة أي تحت حمل الدولاب الأعظمي وعند نقطة استناد الجائز.

* تحت حمل الدولاب الأعظمي $W_{v1} = 383\ \ kN$

- يبين الشكل جانباً انتشار حمل الدولاب عبر السكة بفرض ارتفاع السكة *75 mm* فيحدد سطح التحميل

$$b_1 = 2 \text{ x } 75 = 150\ mm$$



$n_1 = D + 2T_p = 620.2 + 2 \text{ x } 20 = 660.2\, mm$

$\lambda = 2.5\, d/t = 2.50 \text{ x } 540/14.1 = 95$ نسبة نحافة الجسد

– تحدد مقاومة الضغط باستخدام الجدول (4-3c) بدلالة λ و p_y

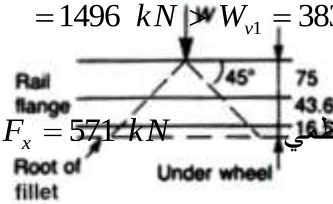
فنجد: $p_c = 131\, N/mm^2$

– تحدد مقاومة الجسد للتحنيب بالعلاقة

$P_w = (b_1 + n_1)\, t\, p_c$

$P_w = (150 + 660.2) \text{ x } 14.1 \text{ x } 131 \text{ x } 10^{-3}$

$= 1496\ kN > W_{v1} = 383\ kN$ o.k.



* عند المسند حيث رد فعل الجائز الأعظمي $F_x = 571\ kN$

– يبين الشكل جانباً انتشار رد الفعل في جسد الجائز وعلى فرض سطح الاستناد الصلب $b_1 = 70\, mm$

$n_1 = D/2 = 620.2/2$
$= 310.1\, mm$

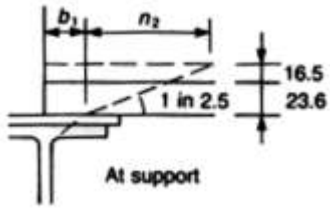
$= 704\ kN > F_x = 571\ kN\ o.k.$

10) تحقيق تحمّل (دهس) الجسد

يجب تحقيق تحمّل جسد المقطع أيضاً عند نقاط تطبيق الأحمال المركزة أي تحت حمل الدولاب الأعظمي وعند نقطة استناد الجائز

* تحت حمل الدولاب الأعظمي

– يبين الشكل جانباً انتشار حمل الدولاب بزاوية °45 في مقطع الجائز وفقاً للفقرة (9-3)



العلاقة (9-9)

$$x = x_R + 2r$$

حيث

$$r = 16.5\,mm$$

$$x_R = 2(H_R + T + T_b)$$

$$x_R = 2(75 + 23.6 + 20) = 237.2\,mm$$

$$x = 237.2 + 2 \text{ x } 16.5 = 270.2\,mm$$

– يحدد تحمل الجسد وفق العلاقة

* عند المسند

– يبين الشكل جانباً انتشار رد الفعل في جسد المقطع

$$b_1 = 70\,mm$$

العلاقة (5-13)

$$n_2 = 2.5\,(T + r)$$

$$= 2.5\,(23.6 + 16.5) = 100\,mm$$

– يحدد تحمل الجسد بالعلاقة

$P_{cw} = (b_1 + n_2)\, t\, p_{yw}$

$P_{cw} = (70 + 100) \times 14.1 \times 265 \times 10^{-3}$

$= 635\ kN > F_x = 571\ kN \qquad o.k.$

11) تحقيق السهوم

يحدد السهمان الشاقولي والأفقي المسموح بهما الناتجان عن حملي الرافعة الشاقولي والأفقي بالعودة إلى الجدول (3-1) كما يلي:

السهم الشاقولي $\delta_{v\lim} = L/600 = 6.5 \times 10^3 / 600 = 10.8\, mm$

السهم الأفقي $\delta_{h\lim} = L/500 = 6.5 \times 10^3 / 500 = 13\, mm$

* يحدد السهم الشاقولي الناتج عن حمل الرافعة الساكن غير المصعد بتوضيع دولابي الرافعة بشكل متناظر حول منتصف مجاز الجائز بالعلاقة التالية:

$$\delta_{v\max} = \frac{W_{vs}\, L^3}{6\, E\, I_x} \left[\frac{3}{8} \left(1 - \frac{a_w}{L} \right) - \left(\frac{L - a_w}{2L} \right)^3 \right]$$

حيث W_{vs} الحمل الشاقولي للدولاب الواحد الساكن دون تصعيد أي:

W

معامل المرونة

$E = 205 \quad kN/mm^2$

عزم عطالة مقطع الجائز الحامل للرافعة

$I_x = 199084 \times 10^4\ mm^4$

المسافة بين الدولابين $a_w = 3.5 \times 10^3\ mm$

مجاز الجائز الحامل للرافعة

$L = 6.5 \times 10^3\ mm$

δ

* يحدد السهم الأفقي الناتج عن حمل فرملة العربة غير المصعّد بتوضيع دولابي الرافعة حول منتصف مجاز الجائز بالعلاقة التالية:

$$\delta_{h\,max} = \frac{W_{hs} L^3}{6E\, I_{cf}} \left[\frac{3}{8}\left(1 - \frac{a_w}{L}\right) - \left(\frac{L - a_w}{2\,L}\right)^3 \right]$$

حيث:

الحمل الأفقي لدولاب واحد $W_{hs} = W_{h1} / 1.4 = 9.1/1.4 = 6.5\ kN$

عزم عطالة الجناح العلوي $I_{cf} = 9350 \text{ x } 10^4\ mm^4$

$$\delta_{h\,max} = \frac{6.5 \text{ x } 6.5^3 \text{ x } 10^9}{6 \text{ x } 205 \text{ x } 9350 \text{ x } 10^4} \left[\frac{3}{8}\left(1 - \frac{3.5}{6.5}\right) - \left(\frac{6.5 - 3.5}{2 \text{ x } 6.5}\right)^3 \right]$$

$$= 2.9\ mm < \delta_{h\,lim} \qquad o.k.$$

الفصل العاشر

تصميـــــم الوصــــلات

Design of Connections

10-1 مقدمة

يُبذل عادةً جهد كبير على اختيار الجمل الإنشائية الأنسب وعلى تصميم عناصرها بحيث تحقق الأمان والاقتصاد دون التحليل الدقيق لوصلات هذه العناصر وهذا ما يثبته أن أغلب حالات انهيار المنشآت الفولاذية ينتج عن خلل في وصلاتها. ولهذا يجب تركيز الانتباه على وصل العناصر الإنشائية ببعضها بحيث يتم تأمين الانسجام الكامل مع الفرضيات التي تم تحليل الجمل الإنشائية وفقها والتي بني تصميم العناصر عليها. ولكي نقوم بدراسة مفصلة لهذا الموضوع يجب أن نميز بين الوصلة نفسها وبين الروابط التي تؤمّن تجميع وربط الوصلة. يستخدم بشكل شائع نوعان من عناصر الربط، إما البراغي أو اللحام وسنقوم في هذا الفصل بدراستهما ودراسة بعض الأنواع الشهيرة من الوصلات.

10-2 البراغي Bolts

إن أشهر أنواع البراغي المستعملة في وصلات المنشآت الفولاذية هي البراغي السوداء ذات الماركة 4.6 والبراغي عالية المقاومة ذات الماركة 8.8 ، حيث يدل الرقم الأول من الماركة على عشر مقاومة شد مادة البرغي مقدرة بالكيلو غرام لكل ميليمتر مربع، أما الرقم الثاني فيدل على النسبة بين إجهاد السيلان ومقاومة الشد. أي أن مقاومة شد البراغي ذات الماركة 4.6 هي $40\,kg/mm^2$ أما إجهاد سيلانها فهو $0.6 \text{ x } 40 = 24\,kg/mm^2$

10-2-1 اعتبارات هندسية

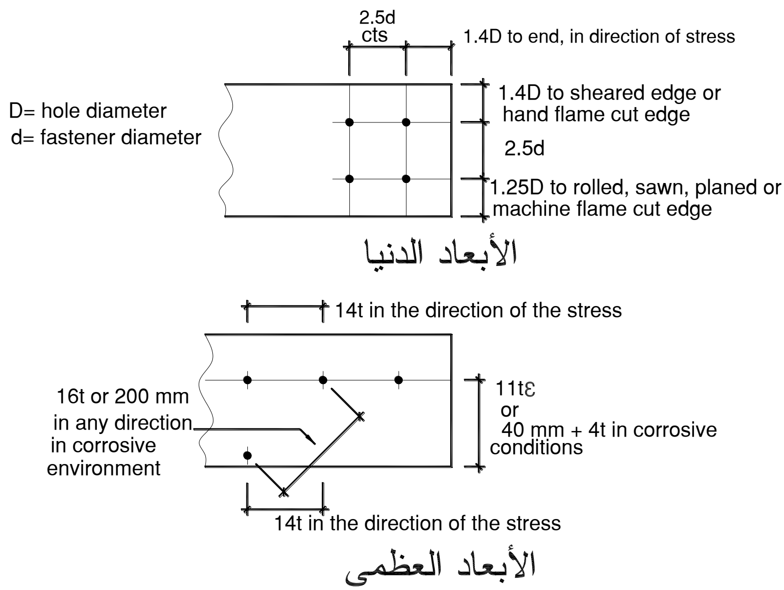
* بغية تسهيل تثبيت البراغي، ينفَّذ قطر الثقب المعدّ في الوصلة أكبر قليلاً من قطر البراغي بتسامح قدره $2\,mm$ للبراغي ذات الأقطار حتى $24\,mm$ وبتسامح قدره $3\,mm$ للبراغي ذات الأقطار الأكبر. ويبين الجدول التالي التسامحات النظامية والتسامحات العظمى المسموح بها :

القطر الأعظمي للثقب $(D)\ mm$	القطر النظامي للثقب $(D)\ mm$	قطر ساق البرغي $(d)\ mm$
$d+5$	$d+2$	$d \le 22$
$d+6$	$d+2$	$d = 24$
$d+8$	$d+3$	$d > 24$

* يجب أن لا تقل المسافة بين مراكز البراغي عن $2.5d$ كما يجب أن لا تزيد هذه المسافة باتجاه الإجهادات عن $14t$ حيث t هي سماكة أرق العناصر الموصولة. وعندما تكون العناصر عرضة للصدأ يجب أن لا تزيد المسافة بين مراكز البراغي في أي اتجاه عن $16t$ أو $200\,mm$ حيث t سماكة أرق العناصر الخارجية. انظر الشكل (10-1).
* يجب أن لا تقل المسافة بين مركز ثقب البرغي وطرف العنصر عمودياً على اتجاه الإجهادات وكذلك بين مركز الثقب ونهاية العنصر عن 1.25 D في حالة المقاطع المدرفلة أو المقصوصة آلياً أو عن 1.4 D في حالة القص اليدوي للعناصر حيث D قطر الثقب. انظر الشكل (10-1). ويجب الانتباه أنه لا يمكن الحصول على كامل مقاومة البرغي للدهس عندما تقل هذه المسافة عن 2D بل

تنخفض مقاومة الدهس بشكل خطي حتى الصفر عندما تنخفض هذه المسافة من 2D إلى 1.4D.

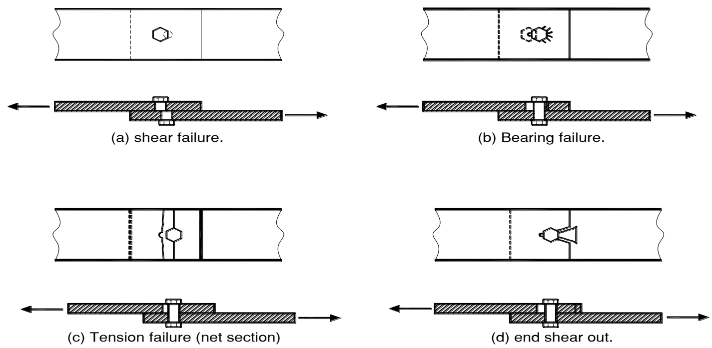
كما يجب أن لا تزيد المسافة بين مراكز صف من البراغي وطرف العنصر الموازي لهذا الصف عن $11t\varepsilon$ حيث: $\varepsilon=(275/p_y)^{1/2}$ ، p_y المقاومة التصميمية للعناصر الموصولة و t سماكة أرق العناصر الموصولة.



الشكل (10-1)

10-2-2 المقاومة التصميمية

يبين الشكل (10-2) حالات الانهيار الرئيسية الأربع لوصلة تراكب خاضعة لقوة شد، ومن الواضح أن هناك حالتي انهيار يمكن أن يتعرض لهما البرغي وحالتين يمكن أن تتعرض لهما العناصر الموصولة ولهذا يجب أن تدرس مقاومة البرغي تحت تأثير جملة من الحالات الإجهادية.



الشكل (10-2) حالات انهيار وصلة تراكب

1) طاقة القص Shear capacity

تحدد طاقة تحمّل البراغي للقص وفق العلاقة التالية:

$$P_s = p_s A_s \qquad (10\text{-}1)$$

حيث: p_s مقاومة القص وتحدد من الجدول (10-2).

A_s تساوي مساحة مقطع البرغي في منطقة جذع السن A_t (والتي تستخدم في حساب مقاومته على الشد) عندما يمر مستوي القص في الجزء المسنن أو تساوي مساحة المقطع العرضي لساق البرغي A إذا مرّ مستوي القص بساق البرغي. ويبين الجدول (10-1) أقطار ومساحات مقاطع البراغي.

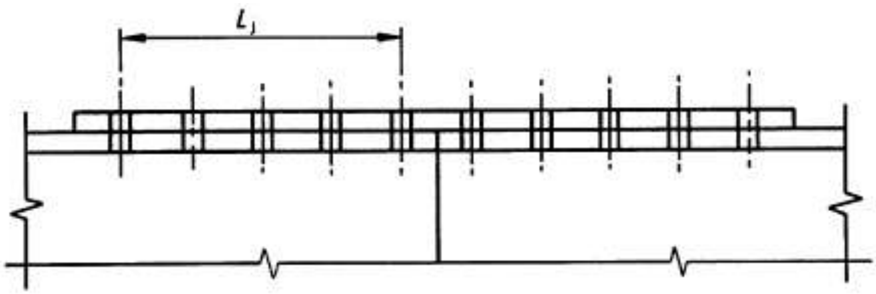
عندما يزيد طول الوصلة L_i (المسافة بين أول صف و آخر صف براغي باتجاه القوة المنقولة في حال وجود أكثر من صفين كما في الشكل (10-3)) على 500mm، تحسب طاقة تحمل البرغي على القص وفق العلاقة التالية:

$$P_s = p_s \ A_s \left(\frac{5500 - L_i}{5000} \right) \qquad (10\text{-}2)$$

الجدول (10-1) أقطار ومساحات مقاطع البراغي									
القطر الاسمي (mm)	12	16	20	22	24	27	30	33	36
المساحة الاسمية $A\ (mm^2)$	113	201	314	380	453	573	706	856	1020
المساحة الصافية $A_t\ (mm^2)$	84.3	157	245	303	353	459	561	684	817

Strength of bolts — الجدول (10-2) مقاومة البراغي	ماركة البرغي Bolt grade	
	gr 4.6	gr 8.8
	N/mm²	N/mm²
Shear strength, p_s مقاومة البرغي للقص	160	375
Bearing strength, p_{bb} مقاومة البرغي للدهس	460	1035
Tension strength, p_t مقاومة البرغي للشد	195	450

الجدول(3-10)مقاومة الأجزاء الموصولة للدهس Bearing strength of connected parts for ordinary bolts, p_{bs}		
Steel to BS 4360 ماركة الفولاذ		
gr 43	gr 50	gr 55
N/mm² 460	N/mm² 550	N/mm² 650



الشكل (3-10) طول وصلة تراكب

وعندما يزيد مجموع سماكات العناصر الموصولة T_g عن خمس مرات قطر البرغي المستخدم في الوصل، تحسب طاقة تحمل البرغي على القص وفق العلاقة التالية:

$$P_s = p_s \, A_s \left(\frac{8\,d}{3\,d + T_g} \right) \qquad (10\text{-}3)$$

2) طاقة الدهس Bearing Capacity

تحدد طاقة تحمل البرغي للدهس بالأصغر من:

a) طاقة تحمله نفسه على الدهس وتحدد بالعلاقة التالية:

$$P_{bb} = d\,t\,p_{bb} \qquad (10\text{-}4)$$

حيث: d القطر الاسمي للبرغي، t سماكة العنصر الموصول.

p_{bb} مقاومة الدهس وتحدد من الجدول (10-2).

b) طاقة تحمل العنصر الموصول على الدهس P_{bs} وتحدد بالعلاقة التالية:

$$P_{bs} = d\,t\,p_{bs} \le e\,t\,p_{bs}/2 \qquad (10\text{-}5)$$

حيث: p_{bs} مقاومة العنصر الموصول للدهس وتحدد من الجدول(10-3).

e المسافة بين مركز الثقب المعد للبرغي ونهاية العنصر.

3) طاقة الشد Tension Capacity

تحدد طاقة تحمل البرغي على الشد P_t بالعلاقة التالية:

$$P_t = p_t\,A_t \qquad (10\text{-}6)$$

حيث : A_t مساحة مقطع البرغي في منطقة جذع السن.

p_t مقاومة البرغي على الشد وتحدد من الجدول (10-2).

4) تحمّل البرغي لتراكب قص مع شد Combined shear and tension

عندما يتعرض البرغي إلى شد وقص معاً، يجب أن يحقق علاقة الترابط التالية:

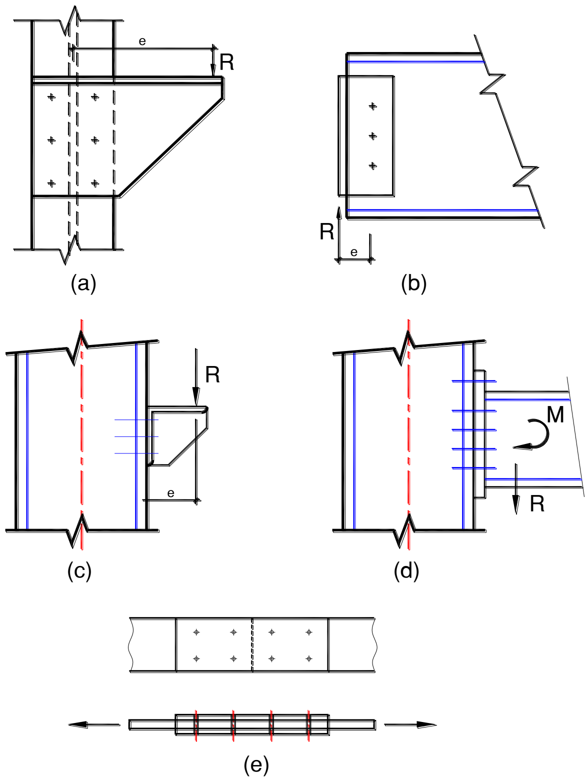
$$\frac{F_s}{P_s} + \frac{F_t}{P_t} \le 1.4 \qquad (10\text{-}7)$$

حيث : F_s و F_t قوتي القص والشد المطبقتين ويجب أن لا تزيد أي منهما عن طاقة تحمل البرغي على القص والشد على الترتيب.

10-3 وصلات البراغي

لقد درسنا في الفقرة السابقة طاقة تحمل البرغي الواحد على الحالات الإجهادية المختلفة وسندرس في هذه الفقرة طاقة تحمل مجموعات البراغي وذلك بعد تحديد مساهمة كل منها ومن ثم تحديد طاقة تحمل الوصلة ككل. ويبين الشكل (10-4)

أشكالاً نموذجية من الوصلات تحتوي على مجموعات من البراغي منها ما يخضع لقوى تمر في مركز ثقل المجموعة ومنها ما يتعرض إلى قوى غير مركزية تنتج قصاً إضافياً ناتجاً عن الفتل أو شداً ناتجاً عن الانعطاف.

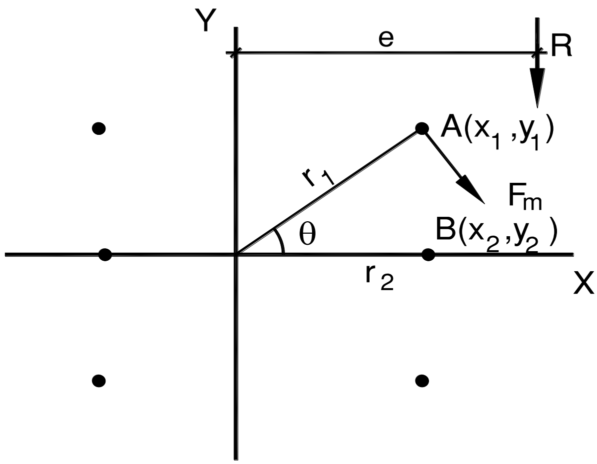


الشكل (10-4) وصلات براغي نموذجية

10-3-1 مجموعة براغي تتعرض لقص مباشر وفتل

يبين الشكل (10-4a) مجموعة تتألف من N برغي تخضع إلى قوة R بلا مركزية قدرها e. يوزع القص المباشر على مجموعة البراغي بالتساوي، أما

القص الناجم عن عزم الفتل Re فيتم توزيعه بشكل متناسب مع بعد البراغي r_i عن مركز ثقل المجموعة. فالبراغي A،B، .... التي إحداثياتها (x_1 , y_1) , (x_2 , y_2) ,...... بالنسبة لجملة إحداثيات تمر في مركز ثقل المجموعة تبعد r_1 , r_2 ,...... عن مركز ثقل المجموعة انظر الشكل (10-5).



الشكل (10-5)

لنفرض أن القوة التي يتعرض لها البرغي الأبعد A والناجمة عن الفتل هي F_m فتكون القوة التي يتعرض لها البرغي B هي $F_m\, r_2 / r_1$ وكذلك تكون القوة المطبقة على البرغي الذي يبعد r_i هي $F_m\, r_i / r_1$ وبمساواة العزم المقاوم لمجموعة البراغي بعزم الفتل الخارجي ينتج:

$$\text{Re} = F_m\, r_1 + F_m \frac{r_2}{r_1} \text{ x } r_2 \,.......... .. = \frac{F_m}{r_1} \text{ x } \sum_{i=1}^{N} r_i^2$$

أو:

$$F_m = \text{Re} \frac{r_1}{\sum_{i=1}^{N} r_i^2} \qquad (10\text{-}8)$$

منحى القوة F_m عمودي على r_1 ويمكن تحليلها إلى مركبتين موازيتين لمحوري الإحداثيات كما يلي:

$$F_{mh} = F_m \sin\theta = F_m \frac{y_1}{r_1} \qquad (10\text{-}9)$$

$$F_{mv} = F_m \cos\theta = F_m \frac{x_1}{r_1} \qquad (10\text{-}10)$$

نبدل العلاقة (8-10) في هاتين العلاقتين وكذلك نبدل $r_i^2 = x_i^2 + y_i^2$ في الناتج فنحصل على:

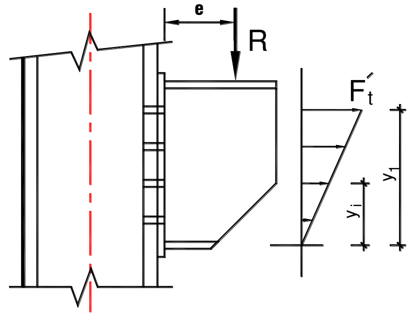
$$F_{mh} = \mathrm{Re}\frac{y_1}{I} \qquad (10\text{-}11)$$

$$F_{mv} = \mathrm{Re}\frac{x_1}{I} \qquad (10\text{-}12)$$

$$I = \sum_{i=1}^{N} x_i^2 + \sum_{i=1}^{N} y_i^2 \qquad (10\text{-}13)$$

10-3-2 مجموعة البراغي تتعرض لقص وعزم انعطاف

يبين الشكل (6-10) مجموعة تتألف من N برغي خاضعة إلى قوة R بلا مركزية خارج مستوي المجموعة قدرها e أي أن المجموعة تخضع إلى عزم انعطاف قدره Re. يتعرض كل برغي من المجموعة إلى قوة قص مباشر قدرها R/N وإلى قوة شد ناتجة عن عزم الانعطاف . تحدد قوة الشد في كل برغي بفرض أنها تتناسب طرداً مع بعد البرغي عن محور الدوران الذي يمر من مركز الجناح المضغوط للظفر كماهو مبين في الشكل (6-10).



الشكل (10-6)

بفرض أن القوة المطبقة على صف البراغي الأبعد F_t' والذي يبعد عن محور الدوران مسافة y_1 فتكون القوة المطبقة على صف البراغي i والذي يبعد عن محور الدوران بالمقدار y_i مساوية $F_t' y_i / y_1$. بمساواة مجموع عزوم هذه القوى بالعزم المطبق الخارجي ينتج:

$$\mathrm{Re} = F_t' y_1 + F_t' \frac{y_2}{y_1} \text{ x } y_2 + ... = \frac{F_t'}{y_1} \text{ x } \sum_{i=1}^{n} y_i^2 \qquad (10\text{-}14)$$

أو :

$$F_t' = \mathrm{Re}\,\frac{y_1}{I_x} \qquad (10\text{-}15)$$

حيث : $I_x = \sum_{i=1}^{n} y_i^2$ ، n عدد صفوف البراغي

وباعتبار أن عدد البراغي في الصف الواحد m فتكون قوة الشد التي يخضع لها البرغي الواحد في الصف الأبعد مساوية:

$$F_t = F_t' / m \qquad (10\text{-}16)$$

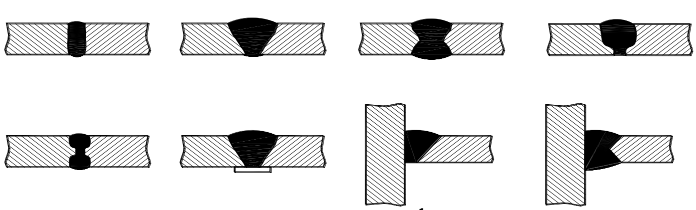
10-4 اللحـــــام

هناك نوعان من اللحام:

10-4-1 لحام الإملاء Butt weld

هو اللحام الذي يجمع جزئين في نفس سماكة المعدن الأصلي كما هو مبين في الشكل (10-7). عندما تكون الأجزاء الموصولة رقيقة، يكون من السهل أن يخترق اللحام كامل السماكة دون اللجوء إلى تحضير الأجزاء الملحومة. وعندما تكون الأجزاء سميكة لا بد من تحضير نهاياته ا لتشكل عند جمعها حرف V أو U من وجهة واحدة أو من وجهين للأجزاء المزمع وصلها وذلك وفقاً لسماكة المعدن ولطريقة اللحام ، وتبين المواصفة البريطانية BS 5135 الأشكال المختلفة لتحضير العناصر الملحومة.

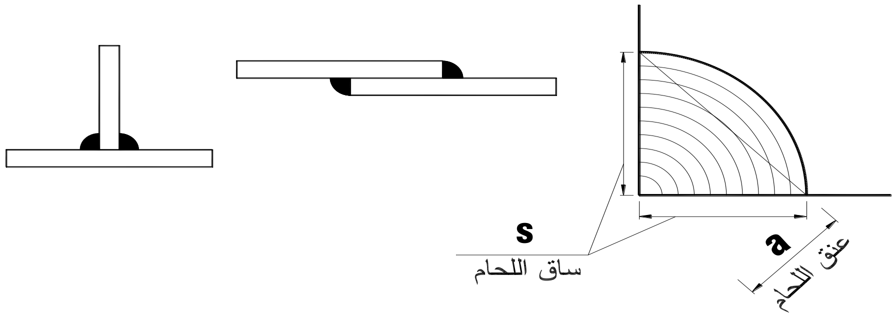
تُؤخذ مقاومة لحام الإملاء مساوية لمقاومة الأجزاء الملحومة شريطة أن يتم تنفيذ اللحام بقضبان لحام تنتج عينات من اللحام لها مقاومة شد وحد سيلان ليسا أقل مما للفولاذ الملحوم وفقاً للمواصفة BS 709



الشكل (10-7) أشكال مختلفة من لحام الإملاء

10-4-2 اللحام الزاوي Fillet weld

يتم تنفيذ اللحام الزاوي بين عنصرين يصنع وجهيهما القابلين للانصهار زاوية بين 60° و 120° ويبين الشكل (10-8) طريقة اللحام الزاوي.



الشكل (10-8) لحام زاوي

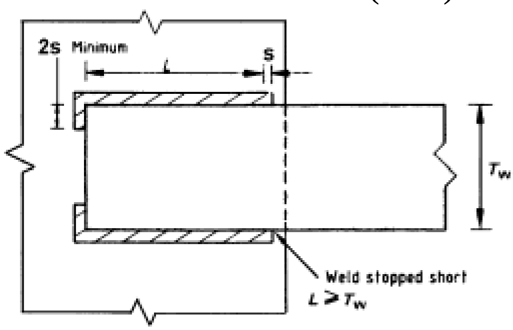
يقاس اللحام الزاوي بطول ساقه (s) المبينة في الشكل (10-8) أما مقاومته فتحسب بناءً على طول عنقه (a) المبين في الشكل ذاته أيضاً. ويحدد طول العنق بالنسبة للساق وفقاً للمواصفة BS 5135 من الجدول (10-4) وذلك بدلالة الزاوية بين السطحين الملحومين

الجدول (10-4) طول عنق اللحام بدلالة الزاوية بين السطحين الملحومين	
الزاوية بين السطحين الملحومين بالدرجة	نسبة عنق اللحام إلى قياس اللحام
60 to 90	0.7
91 to 100	0.65
101 to 106	0.6
107 to 113	0.55
114 to 120	0.5

يحدد الطول الفعال للحام الزاوي بطوله الفعلي مطروحاً منه ضعف طول ساقه وذلك للأخذ بالحسبان جودة اللحام المتدنية في البداية والنهاية. ويجب أن لا يقل طول اللحام عن أربع مرات طول ساقه، كما يجب أن لا يقل طول اللحام الزاوي

الطولي L المستخدم في وصل نهاية عنصر ما عن المسافة الفاصلة عرضياً بين خطي اللحام الطولي، انظر الشكل (9-10).

كما يجب تدوير اللحام حول الزوايا بطول 2s في نهاية أو طرف الصفيحة الملحومة كما في الشكل(9-10).



الشكل (9-10) لحام نهاية عنصر

يمكن تنفيذ اللحام الزاوي بشكل متقطع على أن يحسب طول كل قطعة لحام وفقاً للفقرة السابقة، كما يجب أن لا يزيد طول المسافة غير الملحومة عن *300* mm أو 16 t للعناصر المضغوطة و 24 t للعناصر المشدودة حيث *t* سماكة أرق العناصر الملحومة.

تحدد المقاومة التصميمية p_w للحام الزاوي المنفذ بقضبان لحام محققة للمواصفة البريطانية BS 639 وفق الجدول (5-10)

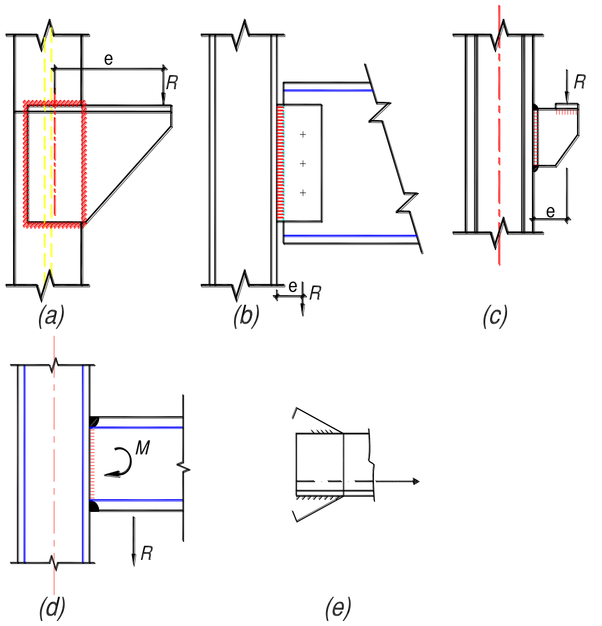
الجدول (5-10) مقاومة اللحام الزاوي التصميمية

Design strength, p_w

مقاومة قضيب اللحام Electrode strength to BS 639		ماركة الفولاذ Grade of steel in BS 4360
E43	E51	
N/mm²	N/mm²	
215	215	40 or 43
215	255	WR50 and 50
—	255	55

10-5 وصـــلات اللحـــــام

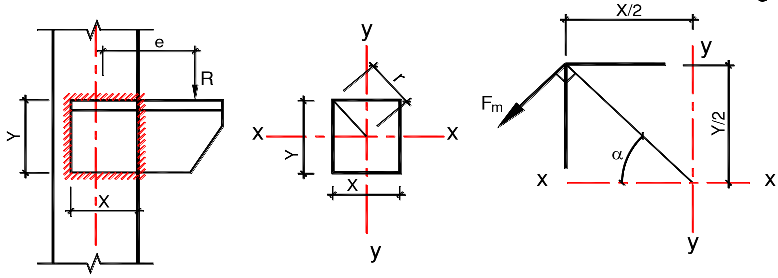
لقد تناولنا في الفقرة السابقة أنواع اللحام مع تركيز خاص على اللحام الزاوي لكثرة استعماله في وصلات المنشآت، وسندرس في هذه الفقرة طاقة تحمّل مجموعات اللحام من خلال استعمالها في الوصلات الملحومة. ويبين الشكل (10-10) مجموعة من الوصلات النموذجية المنفذة بواسطة اللحام الزاوي، منها ما يخضع إلى قص مباشر يمر من مركز ثقل مجموعة اللحام ومنها ما يخضع أيضاً إلى قص ناتج عن عزم فتل بسبب عدم مرور القوة المطبقة في مركز ثقل مجموعة اللحام ومنها أيضاً ما يخضع إلى شد ناتج عن الانعطاف بسبب وقوع القوة المطبقة خارج مستوي مجموعة اللحام.



الشكل (10-10) وصلات لحام نموذجية

10-5-1   مجموعة اللحام تتعرض إلى قص مباشر وفتل

يبين الشكل (10-11) وصلة لحام تتعرض إلى قوة خارجية R بلا مركزية قدرها e



الشكل (10-11)

يوزع القص الشاقولي على كامل طول اللحام فيحدد القص المباشر في واحدة الطول من اللحام وفق العلاقة التالية:

$$F_v = \frac{R}{2X + 2Y} \qquad (10\text{-}17)$$

أما قص الفتل الناتج عن لا مركزية القوة الخارجية فيوزع بشكل متناسب مع بعد أي عنصر لحام عن مركز مجموعة اللحام. وبمحاكمة منطقية مشابهة لما أوردناه في الفقرة (10-3-1) نحدد قص الفتل بالعلاقة التالية:

$$F_m = \frac{\mathrm{Re}\,\mathrm{r}}{I_p} \qquad (10\text{-}18)$$

حيث : F_m القص في واحدة الطول في اللحام الأبعد عن مركز ثقل المجموعة.

r بعد عنصر اللحام الأبعد ويحسب بالعلاقة $r = \frac{1}{2}\sqrt{X^2 + Y^2}$

I_p عزم العطالة القطبي لمجموعة اللحام ويحدد بالعلاقة التالية:

$$I_P = I_x + I_y \qquad (10\text{-}19)$$

$$I_x = 2\left[Y^3/12 + X\left(Y/2\right)^2 \right] \qquad (10\text{-}20\ a)$$
$$I_y = 2\left[X^3/12 + Y\left(X/2\right)^2 \right] \qquad (10\text{-}20\ b)$$

كما هو مبين في الشكل (10-11c) إن منحى القوة F_m عمودي على r ويمكن تحليلها إلى مركبتين موازيتين لمحوري الإحداثيات:

$$F_{mh} = F_m \sin\alpha = F_m \frac{Y}{2r}$$
$$F_{mv} = F_m \cos\alpha = F_m \frac{X}{2r}$$

نعوض العلاقة (10-18) في هاتين العلاقتين فينتج:

$$F_{mh} = \frac{\text{Re}\, Y}{2\, I_p} \qquad (10\text{-}21)$$
$$F_{mv} = \frac{\text{Re}\ X}{2\, I_p} \qquad (10\text{-}22)$$

ومنه تحدد حاصلة قوة القص F_r في واحدة الطول التي يتعرض لها عنصر اللحام الأبعد وفق العلاقة التالية:

$$F_r = \sqrt{\left(F_v + F_{mv}\right)^2 + \left(F_{mh}\right)^2} \qquad (10\text{-}23)$$

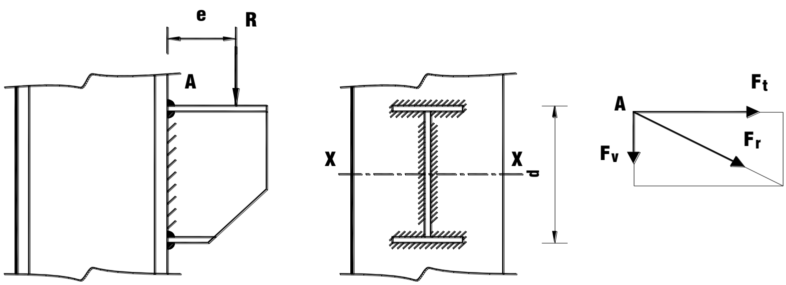
كي نحصل على الإجهاد المطبق على اللحام نقسم F_r على عنق اللحام a . ويجب أن نقارن هذا الإجهاد بمقاومة اللحام التصميمية p_w المستخرجة من الجدول (10-5).

10-5-2 مجموعة اللحام تتعرض إلى قص مباشر وعزم انعطاف

يبين الشكل (10-12) وصلة لحام معرضة إلى قوة خارجية R واقعة خارج مستوي اللحام بلا مركزية قدرها e . يوزع القص الشاقولي على كامل طول اللحام

الفعال L فنحصل على القص الشاقولي F_v في واحدة الطول من اللحام بتطبيق العلاقة التالية:

$$F_v = R/L \qquad (10\text{-}24)$$



الشكل (10-12)

أما قوة الشد F_t التي تتعرض لها واحدة الطول من خط اللحام الأبعد عن مركز ثقل المجموعة فتحدد باستخدام العلاقة الخاصة بانعطاف الجوائز أي:

$$F_t = \frac{R\,e\,d}{2\,I_x} \qquad (10\text{-}25)$$

حيث : I_x عزم عطالة مجموعة اللحام حول المحور x المار من مركز ثقلها آخذين بالحسبان عنق اللحام مساوياً واحدة الطول.

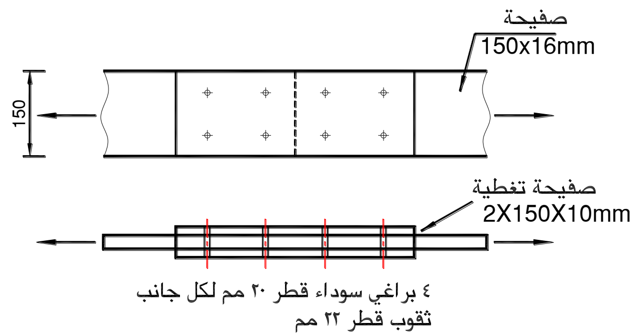
وتحدد محصلة القوة التي تتعرض لها واحدة الطول من خط اللحام الأبعد بالعلاقة التالية:

$$F_r = \sqrt{F_v^2 + F_t^2} \qquad (10\text{-}26)$$

كي نحصل على الإجهاد المطبق على اللحام نقسم F_r على عنق اللحام a ، ويجب مقارنة هذا الإجهاد بالمقاومة التصميمية للحام p_w المستخرجة من الجدول (10-5).

مثال : (10-1)

احسب مقاومة الوصلة المبينة في الشكل أدناه وذلك باعتبار مقاومة مجموعة البراغي وصفيحة الوصل والعنصر المشدود، علماً أن ماركة فولاذ صفيحتي الوصل والعنصر المشدود 43 وأن البراغي المستخدمة سوداء ماركتها 4.6 وقطر البرغي *20 mm*



<u>الحــل:</u>

* حساب مقاومة مجموعة البراغي:

– تحدد طاقة تحمّل البرغي للقص باستخدام العلاقة (10-1) ولكن مع الانتباه إلى وجود سطحين للقص أي:

الجدولين (10-1) (10-2)

$$\left.\begin{aligned} P_s &= 2 p_s \, A_s \\ A_s &= 245\ mm^2 \\ p_s &= 160\ N/mm^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow P_s = 2 \times 160 \times 245 \times 10^{-3} = 78.4\,kN$$

ومنه تحدد طاقة تحمّل مجموعة البراغي على القص كما يلي:

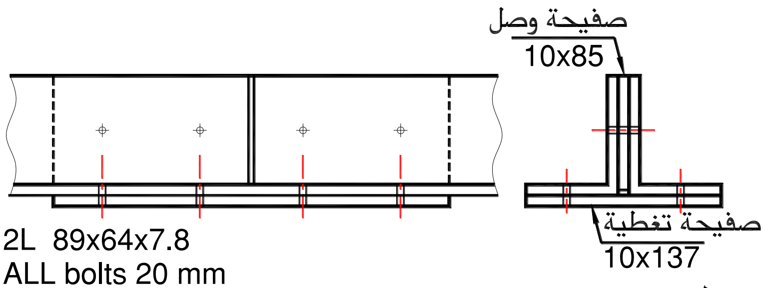
$$F_s = 4 \times P_s = 313.6\,kN$$

– تحدد طاقة تحمّل البراغي على الدهس باستخدام العلاقة (10-4) على العنصر المشدود لأن سماكته أقل من مجموع سسماكتي صفيحتي الوصل.

الجدول (10-2)	$\left.\begin{array}{l} P_{bb} = d\ t\ p_{bb} \\ p_{bb} = 460\ N/mm^2 \end{array}\right\} \Rightarrow P_{bb} = 20 \text{ x } 16 \text{ x } 460 \text{ x } 10^{-3} = 147.2\ kN$
	– ومنه تحدد طاقة تحمّل مجموعة البراغي على الدهس $F_{bb} = 4 \text{ x } P_{bb} = 4 \text{ x } 147.2 = 588.8\ kN$ – تحدد طاقة تحمّل العنصر المشدود على الدهس من أجل برغي واحد بتطبيق العلاقة (9-5) أي:
الجدول (10-3)	$\left.\begin{array}{l} P_{bs} = d\ t\ p_{bs} \\ p_{bs} = 460\ N/mm^2 \end{array}\right\} \Rightarrow P_{bs} = 20 \text{ x } 16 \text{ x } 460 = 147.2\ kN$
	– ومنه تحدد طاقة تحمّل العنصر على الدهس من أجل مجموعة البراغي $F_{bs} = 4 \text{ x } 147.2 = 588.8\ kN$ – إذاً مقاومة مجموعة البراغي $F_1 = F_s = 313.6\ kN$ * حساب طاقة تحمّل العنصر المشدود
الجدول (2-1)	– تحدد المقاومة التصميمية للعنصر بدلالة سماكته $T = 16\ mm$ فنجد $p_y = 275\ N/mm^2$
	– ومنه تحدد مقاومة العنصر المشدود كما يلي: $F_2 = p_y\ A_{net} = 275 \text{ x } \left[(150 - 2 \text{ x } 22) \text{ x } 16 \right] \text{ x } 10^{-3} = 466.4\ kN$ – إذاً مقاومة الوصلة هي الأصغر من F_1 و F_2 أي $313.6\ kN$ وهي مقاومة مجموعة البراغي على القص.

مثال (10-2)

احسب طاقة تحمّل الوصلة المبينة في الشكل أدنا، علماً أن ماركة الفولاذ المستخدم 43 وأن البراغي سوداء قطرها *20 mm* وماركتها *4.6*



<u>الحـــــل:</u>

* حساب طاقة تحمّل مجموعة البراغي

– تحدد مقاومة البرغي على القص الإفرادي باستخدام العلاقة (10-1)

الجدولين (10-1) (10-2)

$$\left.\begin{aligned} P_s &= p_s\ A_s \\ A_s &= 245\ mm^2 \\ p_s &= 160\ N/mm^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow P_s = 39.2\ kN$$

– يجب الانتباه إلى أن كل طرف من الوصلة يحتوي على برغيين يتعرضان إلى قص مزدوج وإلى أربعة براغي تتعرض إلى قص منفرد، وعليه تحدد مقاومة مجموعة البراغي على القص كما يلي:

$$F_s = 2 \text{ x } 2 \text{ x } 39.2 + 4 \text{ x } 39.2 = 313.6\ kN$$

– تحدد مقاومة البرغي الرابط لصفيحة الوصل مع الزاويتين على الدهس باستخدام العلاقة (10-4) كما يلي:

$$\left.\begin{aligned} P_{bb} &= d\ t\ p_{bb} \\ p_{bb} &= 460\ N/mm^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow P_{bb} = 20 \text{ x } 10 \text{ x } 460 \text{ x } 10^{-3} = 92\ kN$$

أما مقاومة البرغي الرابط لصفيحة التغطية مع الزاويتين على الدهس فتحدد كما يلي:

الجدول (10-2)

$$P_{bb} = 20 \text{ x } 7.8 \text{ x } 460 \text{ x } 10^{-3} = 71.76\, kN$$

- يوجد أربعة براغي تربط صفيحة التغطية مع الزاويتين وبرغيان يربطان صفيحة الوصل مع الزاويتين، وعليه تحسب مقاومة مجموعة البراغي على الدهس كما يلي:

$$F_{bb} = 2 \text{ x } 92 + 4 \text{ x } 71.76 = 471\, kN$$

- تحدد طاقة تحمّل مقاومة صفيحة الوصل على الدهس عند كل برغي كما يلي:

العلاقة (10-5) الجدول (10-3)

$$\left.\begin{aligned} P_{bs} &= d\ t\ p_{bb} \\ p_{bs} &= 460\ N/mm^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow P_{bs} = 20 \text{ x } 10 \text{ x } 460 \text{ x } 10^{-3} = 92\, kN$$

- تحسب طاقة تحمّل ساق الزاوية على الدهس عند كل برغي كما يلي:

$$P_{bs} = 20 \text{ x } 7.8 \text{ x } 460 \text{ x } 10^{-3} = 71.76\, kN$$

وكما بينا سابقاً يوجد أربعة براغي تربط صفيحة التغطية مع الزاويتين وبرغيان يربطان صفيحة الوصل مع الزاويتين، وعليه تحسب مقاومة العناصر الموصولة على الدهس كما يلي:

$$P_{bs} = 2 \text{ x } 92 + 4 \text{ x } 71.76 = 471\, kN$$

- إذاً طاقة تحمّل مجموعة البراغي هي:

$$F_1 = F_s = 313.6\, kN$$

* حساب مقاومة الزاويتين:

- بالعودة إلى الجدول (1-2) نحدد المقاومة التصميمية بدلالة سماكة الزاوية $t = 7.8\, mm$ فنجد: $p_y = 275\ N/mm^2$

- وكذلك بالعودة إلى جداول خصائص المقاطع الفولاذية نجد أن المساحة

الكلية للزاوية الواحدة تساوي $1137\ mm^2$. وللحصول على المساحة الصافية للزاويتين يجب أن نطرح مساحة أربعة ثقوب قطر كل منها $22\ mm$.	
$A_{net} = 2\ \text{x}\ 1137 - 4\ \text{x}\ 22\ \text{x}\ 7.8 = 1587.6\ mm^2$	الفقرة
وتحسب المساحة المكافئة بضرب المساحة الصافية بالمعامل $k_e = 1.2$ أي:	(3-1)
$A_e = k_e\ A_{net} = 1.2\ \text{x}\ 1587.6 = 1905.12\ mm^2$	
ومنه تحدد مقاومة الزاويتين على الشد كما يلي:	العلاقة
$P_{t_1} = A_e\ p_y = 1905.12\ \text{x}\ 275\ \text{x}\ 10^{-3} = 523.9\ kN$	(3-1)
* حساب طاقة تحمّل صفيحتي الوصل والتغطية	
– كما سبق فإن $p_Y = 275\ \text{N}/mm^2$ لأن سماكة كل من الصفيحتين أقل من *16 mm* وكذلك تحدد المساحة الصافية للصفيحتين بطرح مساحة ثلاثة ثقوب. أي:	
$A_{net} = (85 + 137 - 3\ \text{x}\ 22)\ \text{x}\ 10 = 1560\ mm^2$	
$A_e = 1.2\ A_{net} = 1872\ mm^2$	
$P_{t_2} = A_e\ p_y = 1872\ \text{x}\ 275\ \text{x}\ 10^{-3} = 514.8\ kN$	
– إذاً طاقة تحمّل الوصلة ستكون مساوية للأصغر من F_1 و P_{t_1} و P_{t_2} أي $313.6\ kN$ وهي طاقة تحمّل مجموعة البراغي على القص.	

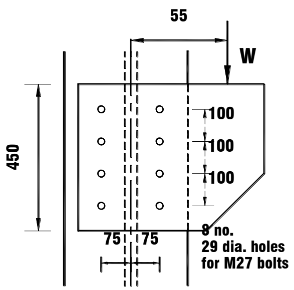
مثال (3-10)

حقق ظفر الرافعة المبين في الشكل أدناه على رد شاقولي

$W = 462$ kN مطبّق بلا مركزية $e = 55\,cm$ علماً أن الظفر يتألف

من صفيحتين سماكة كل منهما $20\,mm$ وماركة فولاذهما 43 وأن

البراغي المستخدمة سوداء قطر كل منها 27 mm وماركتها (8.8 M 27) 8.8



الحـــل:

* تحقيق الظفر:

– العزم المطبق الخارجي

$$M_x = 462 \text{ x } 0.55 = 254\ kNm$$

– مساحة القص الفعالة

الفقرة (5-2)

$$A_v = 0.9A = 0.9\left(450 - 4 \text{ x } 29\right) \text{x } 20 \text{ x } 2 = 12020\ mm^2$$

الجدول (2-1)

– المقاومة التصميمية $p_y = 265\ N/mm^2$

– طاقة تحمل القص

العلاقة (5-1)

$$P_v = 0.6\, p_y\, A_v = 0.6 \text{ x } 265 \text{ x } 12020 \text{ x } 10^{-3} = 1910\ kN$$

$$F_v / P_v = W / P_v = 462/1910 = 0.24 < 0.6$$

العلاقة (5-3)

– تحدد طاقة تحمل العزم وفق العلاقة $M_c = p_y\, Z$

عزم عطالة مقطع الصفيحتين عند الصف الشاقولي الأول من البراغي حول محور مار في منتصف ارتفاع المقطع

$$I = 2\left[\,20 \text{ x } 450^3/12 - 2x20x29x50^2 - 2x20x29x150^2\,\right]$$

$$I = 24580\ cm^4$$

$$Z = I/22.5 = 1090\ cm^3$$

$$M_c = 265 \text{ x } 1090 \text{ x } 10^{-3} = 289\ kN > M_x = 254\ kN \quad o.k.$$

* تحقيق مجموعة البراغي

– يوزع القص المباشر على مجموعة البراغي بالتساوي فتكون حصة البرغي $F_v = 462/8 \text{ x } 2 = 28.9\ kN$

– تحدد مركبتي القص الناتج عن الفتل في البرغي الأبعد وفق العلاقتين (10-11,12) ويحدد عزم عطالة مجموعة البراغي وفق العلاقة (10-13)

$$I = 2\left[\sum_{i=1}^{8} x_i^2 + \sum_{i=1}^{8} y_i^2\right]$$

$$I = 2\left[8 \text{ x } 75^2 + 4 \text{ x } 50^2 + 4 \text{ x } 150^2\right] = 290000\ mm^2$$

العلاقة (10-11)

$$F_{mh} = \frac{We \text{ x } y_1}{I} = \frac{462 \text{ x } 550 \text{ x } 150}{290000} = 131.43\ kN$$

العلاقة (10-12)

$$F_{mv} = \frac{We \text{ x } x_1}{I} = \frac{462 \text{ x } 550 \text{ x } 75}{290000} = 65.7\ kN$$

– تحدد محصلة القوى القاصة المطبقة على البرغي الأبعد كما يلي:

$$F_r = \sqrt{(F_v + F_{mv})^2 + F_{mh}^2} = \sqrt{(28.9 + 65.7)^2 + (131.43)^2}$$

$$F_r = 162\ kN$$

– تحدد طاقة تحمّل مقاومة البرغي على القص باستخدام العلاقة (10-1)

الجدولين (10-1) (10-2)

$$\left.\begin{aligned} P_s &= p_s\ A_s \\ A_s &= 459\ mm^2 \\ p_s &= 375\ N/mm^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow P_s = 375 \text{ x } 459 \text{ x } 10^{-3} = 172\ kN > F_r \quad o.k.$$

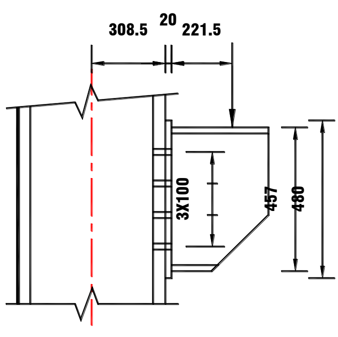
– تحدد طاقة تحمّل البرغي على الدهس وفق العلاقة (10-4)

الجدول (10-2)

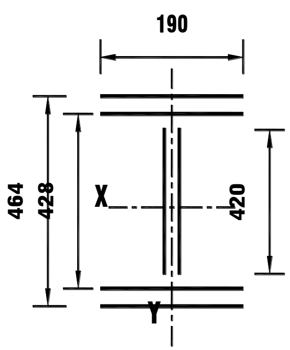
$$\left.\begin{aligned} P_{bb} &= d\ t\ p_{bb} \\ p_{bb} &= 1035\ N/mm^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow P_{bb} = 27 \text{ x } 20 \text{ x } 1035 \text{ x } 10^{-3}$$

$$= 559\ kN > F_r \qquad o.k.$$

– تحدد طاقة تحمّل صفيحة الظفر على الدهس بالعلاقة (10-5) $\left.\begin{array}{l} P_{bs} = d\ t\ p_{bs} \\ p_{bs} = 460\ N/mm^2 \end{array}\right\} \Rightarrow P_{bs} = 27 \text{ x } 20 \text{ x } 460 \text{ x } 10^{-3}$ $= 243\ kN > F_r \qquad o.k.$ – إذاً مقاومة مجموعة البراغي محققة أيضاً.	الجدول (10-3)

مثال (10-4) حقق ظفر الرافعة المبين في الشكل أدناه على رد فعل شاقولي $W = 462\ kN$ مطبّق على بعد قدره $e = 221.5\ mm$ من وجه العمود ، علماً أن الظفر مقطوع من جائز $457 \text{ x } 191 \text{ x } 89\ UB$ ماركة فولاذه 43 والبراغي المستخدمة سوداء بقطر $22\ mm$ وماركتها 8.8 (8.8M22) وأن قياس اللحام الزاوي المستخدم بين الظفر وصفيحة النهاية هو 6 mm  الحـــل: * تحقيق الظفر – من جداول خواص المقاطع نجد: $D = 463.4\ mm \quad B = 191.9\ mm,\ t = 10.5\ mm\ T = 17.7\ mm,$ $d = 407.6\ mm\ ,\ b/T = 5.42 \quad d/t = 38.8,\ S_x = 2014\ cm^3$ – قوة القص والعزم الخارجين $F_v = W = 462\ kN$ $M_x = 462 \text{ x } 221.5 \text{ x } 10^{-3} = 102\ kN$	

- بما أن : $T = 17.7\ mm$ فإن $p_y = 265\ N/mm^2$	الجدول (2-1)
و $\varepsilon = (275/p_y) = 1.02$	
- المقطع مدمج لأن	
$b/T = 5.42 < 9.5\,\varepsilon = 9.69$	الجدول (2-2)
$d/t = 38.8 < 98\,\varepsilon = 99.96$	
- مساحة القص الفعال	
$A_v = tD = 10.5 \text{ x } 463.4 = 4865.7\ mm^2$	الفقرة (5-2)
- طاقة تحمل القص	
$P_v = 0.6\ p_y\ A_v = 0.6 \text{ x } 265 \text{ x } 4865.7 \text{ x } 10^{-3}$	العلاقة (5-1)
$= 773.6\ kN > F_v = 462 \text{ kN} \quad o.k.$	
- طاقة تحمل العزم	
بما أن $F_v < 0.6\,P_v$ فتحدد طاقة تحمل العزم كما يلي:	
$M_c = p_y\ S_x = 265 \text{ x } 2014 \text{ x } 10^{-3} = 533.7\ kN > M_x \quad o.k.$	العلاقة (5-2)
إذاً الظفر محقق.	
* تحقيق لحام الظفر إلى صفيحة النهاية	
يبين الشكل أدناه طول اللحام الزاوي المستخدم ومواقعه	



- طول اللحام المستخدم

$$L = 4 \text{ x } 190 + 2 \text{ x } 420 = 1600\ mm$$

-تحدد قوة القص الشاقولي F_v على واحدة الطول من اللحام كما يلي:

$$F_v = 462 \text{ x } 10^3 / 1600 = 289\ N/m$$

-عزم عطالة مجموعة اللحام حول محور مار في مركز ثقلها

$$I_x = 2 \text{ x } 420^3/12 + 2 \text{ x } 190 \text{ x } 214^2 + 2 \text{ x } 190 \text{ x } 232^2$$
$$= 50.2 \text{ x } 10^6 \; mm^3$$

– قوة الشد التي تتعرض لها واحدة الطول من خط اللحام الأبعد

العلاقة (10-25)

$$F_t = \frac{M_x \text{ D}}{2I_x} = \frac{102 \text{ x } 463.4 \text{ x } 10^6}{2 \text{ x } 50.2 \text{ x } 10^6} = 471 \;\; N/mm$$

– تحدد محصلة القوة التي يتعرض لها اللحام كما يلي:

العلاقة (10-26)

$$F_r = \sqrt{F_v^2 + F_t^2} = \sqrt{289^2 + 471^2} = 552.6 \;\; N/mm$$

– يحدد عنق اللحام $a = 0.7s = 0.7 \text{ x } 6 = 4.2 \;\; mm$

– يحدد الإجهاد الذي يخضع له اللحام بقسمة F_r على عنق اللحام أي:

$$f_r = F_r / a = 552.6 / 4.2 = 131.6 \; N/mm^2$$

– إذاً اللحام كافٍ لأن:

الجدول (10-5)

$$f_r < \; p_w = 215 \; N/mm^2$$

* تحقيق مجموعة البراغي الرابطة لصفيحة النهاية مع جناح العمود

– القوة المطبّقة والعزم الخارجين $F_v = 462 \; kN$

$$M = 462 \text{ x } (0.2215 + 0.02) = 112 \; kNm$$

– باستخدام ثمانية براغي نجد القص الشاقولي الذي يتعرض له البرغي الواحد $F_s = 462/8 = 57.8 \, kN$

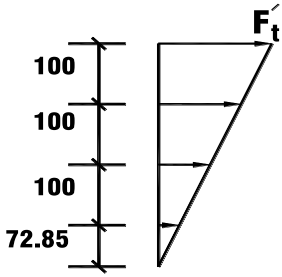
– طاقة تحمّل البرغي للقص

الجدولين (10-1) (10-2)

$$\left.\begin{aligned} P_s &= p_s \; A_s \\ A_s &= 303 \; mm^2 \\ p_s &= 375 \; N/mm^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \; P_s = 375 \text{ x } 303 \text{ x } 10^{-3} = 113.6 \, kN$$

– تحدد قوة الشد في صفوف البراغي بحسب بعدها عن محور الدوران الذي يمر في مركز جناح الظفر المضغوط كما هو مبين في الشكل

أدناه. وعليه تحدد قوة الشد في الصف الأبعد بالعلاقة (10-15)



$$F'_t = \frac{M\,y_1}{I_x}$$

$$y_1 = 72.85 + 3 \text{ x } 100 = 372.82\,mm$$

$$I_x = \sum_{i=1}^{4} y_i^2 = (72.85)^2 + (172.85)^2 + (272.85)^2 + (372.85)^2$$

$$I_x = 248648.5\,mm^2$$

$$F'_t = \frac{112 \text{ x } 372.85 \text{ x } 10^3}{248648.5} = 167.9\,kN$$

– فتكون حصة البرغي الواحد في الصف الأبعد

$$F_t = F'_t/2 = 84\,kN$$

– طاقة شد البرغي

$$\left.\begin{aligned} P_t &= p_t\ A_t \\ A_t &= 303 \\ p_t &= 450 \end{aligned}\right\} \Rightarrow P_t = 450 \text{ x } 303 \text{ x } 10^{-3} = 136.3\,kN$$

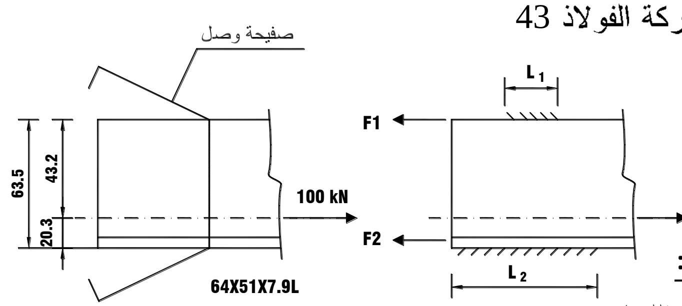
بتطبيق علاقة الترابط (9-7) نجد:

$$\frac{F_s}{P_s} + \frac{F_t}{P_t} = \frac{57.8}{113.6} + \frac{84}{136.3} = 1.125 < 1.4 \qquad o.k.$$

إذاً مجموعة البراغي محققة.

مثال (10-5)

صمم لحام الزاوية المبينة أدناه إلى صفيحة الوصل علماً أن القوة الخارجية المصعّدة تساوي $F = 100\,kN$ وأن قياس اللحام $6\,mm$ وأن ماركة الفولاذ 43



الحـــل:

الجدول (10-4)

- عنق اللحام $a = 0.7 \text{ x } 6 = 4.2\,mm$
- طاقة تحمّل $1\,mm$ من طول اللحام على القص

الجدول (10-5)

$$f_s = a\,p_w = 4.2 \text{ x } 215 = 903\ N/\ mm$$

- القوة التي يجب أن يتحملها اللحام على طول رأس الزاوية

$$F_1 = 100 \text{ x } 20.3 / 63.5 = 32\,kN$$

- طول اللحام اللازم على طول رأس الزاوية

$$L_1 = F_1 / f_s + 2s = 32 \text{ x } 10^3 / 903 + 2 \text{ x } 6 = 48\,mm$$

- لتحقيق الاشتراطات الواردة في الفقرة (10-4-2) يجب أن لا تقل L_1 عن عرض الزاوية أي:

$$L_1 = 63.5 + 2s = 63.5 + 2 \times 6 = 75.5\ mm$$

- القوة التي يجب أن يتحملها اللحام على طول ساق الزاوية

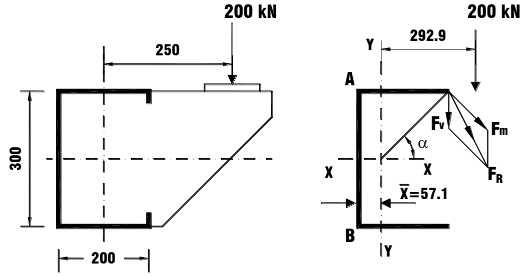
$$F_2 = F - F_1 = 100 - 32 = 68\ kN$$

- طول اللحام اللازم على طول ساق الزاوية

$$L_2 = F_2 / f_s + 2s = 68 \text{ x } 10^3 / 903 + 2 \text{ x } 6 = 88\,mm$$

مثال (10-6)

يبين الشكل أدناه صفيحة ظفر رافعة ملحومة من ثلاثة أطراف. أوجد قوة القص العظمى التي يتعرض لها اللحام واختر قياساً مناسباً له معتبراً أن قياس اللحام ثابت وأن ماركة فولاذ الصفيحة 43



الحـــل:

– طول اللحام $L = 2 \text{ x } 200 + 300 = 700\, mm$

– بعد مركز ثقل مجموعة اللحام عن الطرف AB

$x = 2 \text{ x } 200 \text{ x } 100 / 700 = 57.1$

– لا مركزية القوة المطبّقة

$e = 250 + (200 - 57.1) = 292.9\, mm$

– عزم عطالة اللحام

$I_x = 2 \text{ x } 200 \text{ x } 150^2 + 300^3 / 12 = 11.25 \text{ x } 10^6\, mm^3$

$I_y = 300 \text{ x } 57.1^2 + 2 \text{ x } 200^3 / 12 + 2 \text{ x } 200 \text{ x } 42.9^2$

$= 3.02 \text{ x } 10^6\, mm^3$

$I_p = I_x + I_y = 14.27 \text{ x } 10^6\, mm^3$

– القص المباشر الذي تتعرض له واحدة الطول من اللحام

$F_v = R / L = 200 \text{ x } 10^3 / 700 = 285.7\, N$ العلاقة (10-17)

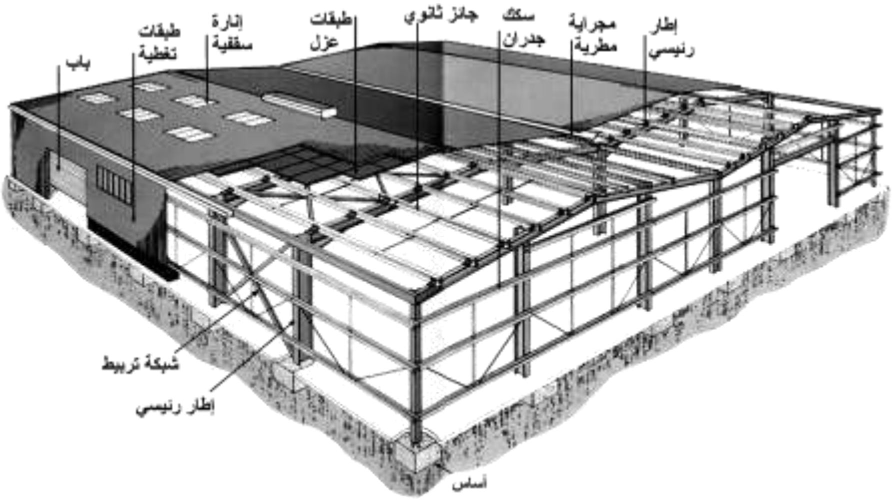
– قوة القص الناتجة عن الفتل التي تتعرض لها واحدة الطول من اللحام الأبعد

العلاقة (10-18)	$\left.\begin{array}{l} F_m = \mathrm{Re}\, r / I_p \\ r = \sqrt{(150)^2 + (200-57.1)^2} = 207.17\ mm \end{array}\right\} \Rightarrow$
	$F_m = 200 \text{ x } 10^3 \text{ x } 292.9 \text{ x } 207.17 / 14.27 \text{ x } 10^6 = 850.5\ N$
	– مركبتي قوة القص الناتجة عن الفتل
	$\cos\alpha = (200-57.1)/207.17 = 0.69$
	$\sin\alpha = 150/207.17 = 0.724$
	$F_{mh} = F_m \sin\alpha = 850.5 \text{ x } 0.724 = 615.7\ N$
	$F_{mv} = F_m \cos\alpha = 850.5 \text{ x } 0.69 = 586.8\ N$
	– حاصلة قوى القص
العلاقة (10-23)	$F_r = \sqrt{615.7^2 + (285.7+586.8)^2} = 1067.9\ N$
	– عنق اللحام
الجدول (10-5)	$a = F_r / p_w = 1067.5/215 = 4.96\ mm$
	– ساق اللحام
	$s = a/0.7 = 7.09\ mm$
	نختار لحام زاوي قياسه *8 mm*

الفصل الحادي عشر
الهيـاكــل الفولاذيـــة

1 - 11 مقدمـــــة

يبين الشكل (1-11) مبنى نموذج ياً من طابق واحد يتألف من صفائح تغطية وعناصر فولاذية ثانوية كسكك الجدران وجوائز السقف الثانوية ومن إطارات رئيسية.



الشكل (1-11) الهيكل الإنشائي لمبنى صناعي

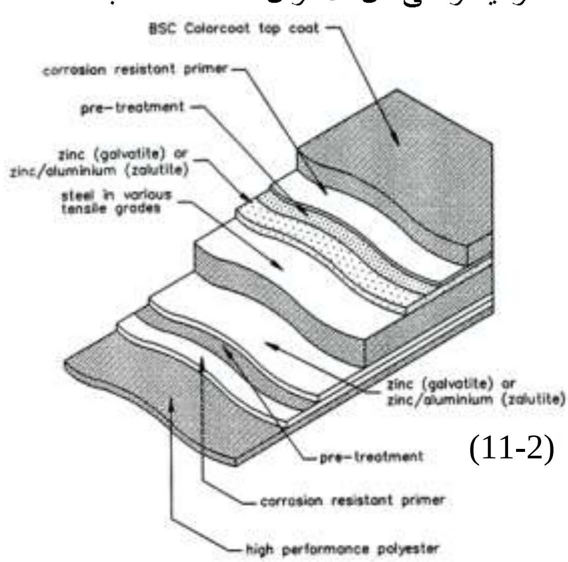
11-2 طبقات التغطية Clading

غالباً تتألف طبقة التغطية الرئيسية من صفائح فولاذية مطلي بطبقات مقاومة للصدأ كما هو مبين في الشكل (2-11) حيث تُغطى الصفائح الفولاذية بطبقة من التوتياء (غلفنة) تليها طبقة دهان أساس (برايمر) ومن ثم طبقة دهان للوجه الخارجي

لتعطي اللون المناسب أو طبقة بوليستر للوجه الداخلي. إذاً تتم حماية الصفائح الفولاذية من الصدأ بشكل رئيسي بطبقة الغلفنة والتي تتألف من طبقة منتظمة من التوتياء بنسبة % 98.5 ويتم تنفيذها بعملية تغطيس مستمر للصفائح في محاليل التوتياء الساخنة. ويجب أن لا يقل وزن طبقتي الغلفنة على وجهي الصفيحة عما هو مبين في الجدول التالي حسب المواصفات البريطانية

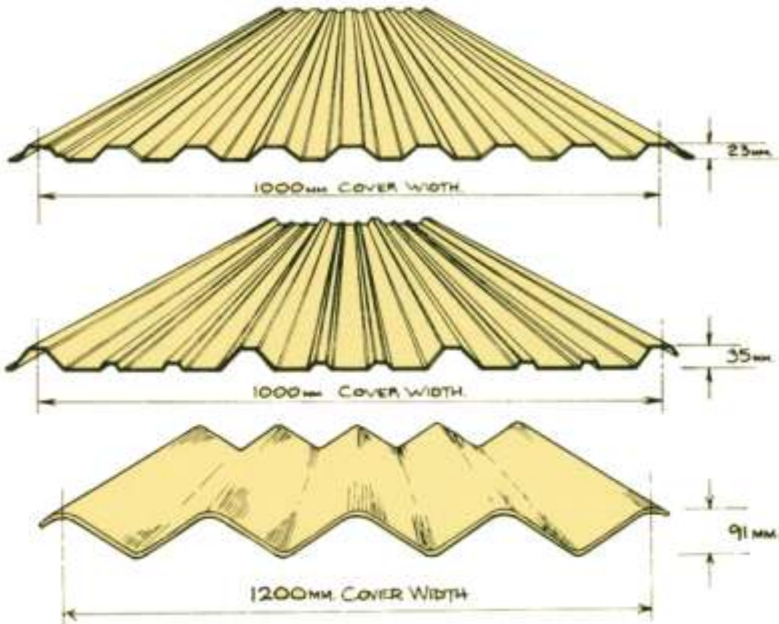
نوع الصفائح	وزن التوتياء على الوجهين	
	Min (g/m^2)	Max (g/m^2)
125	381	455
150	458	548
180	550	608
200	610	762

عندما تتعرض طبقة التوتياء للعوامل الجوية تتآكل ببطء حتى تُستَهلَك في النهاية وتعتمد سرعة التآكل على الشروط المحيطية فتكون سريعة في البيئة الصناعية الملوثة أو في البيئة البحرية، وتكون ديمومة الغلفنة كبيرة جداً عندما تكون الشروط المحيطية غير عدوانية وعلى كل الأحوال كلما كانت طبقة الغلفنة أسمك كلما دامت أطول.



الشكل (2-11)

يتم إعطاء صفائح التغطية صلابة كافية وذلك بتمويجها أو بتضليعها على البارد بأشكال مختلفة كما في الشكل (3-11) وذلك كي تكون قادرة على تحمل الأحمال الحية التي يمكن أن تُطبَّق عليها خلال عمليات التركيب والصيانة وخلال استثمار المنشأ ويُحدد تحمل صفائح التغطية حسب أشكالها من نشرات الشركات المصنِّعة.

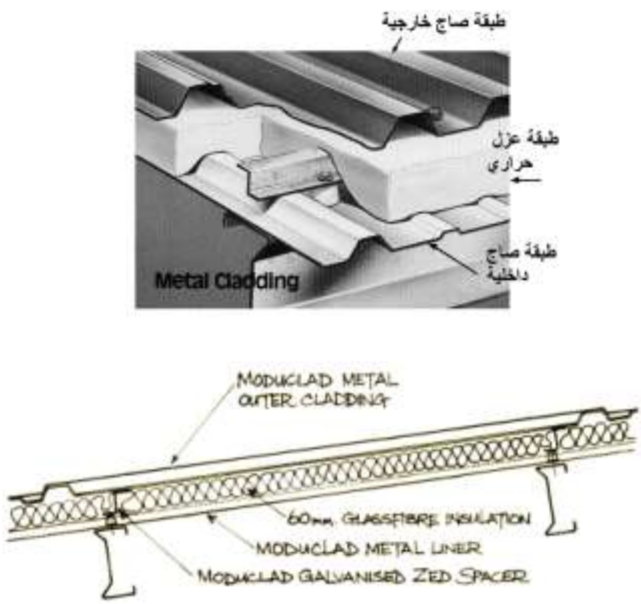


الشكل (3-11) أشكال مختلفة من صفائح التغطية

يجب أن تكون طبقات التغطية كتيمة ضد العوامل الجوية وأن تؤمن عازلية حرارية مناسبة وأن يكون منظرها جميلاً وأن تدوم لفترة طويلة مع الحد الأدنى من الصيانة. مواصفات تغطية الأسقف تختلف عن مواصفات تغطية الجدران إلى حد ما حيث متطلبات الكتامة في الأسقف تزداد في ضوء الطلب المتزايد على تخفيض زاوية ميل الأسقف. ويمكن أن يتم إنشاء طبقات التغطية على أشكال مختلفة من أهمها:

11-2-1 طبقة تغطية ثنائية القشرة Double shell cladding

تتألف طبقة التغطية كما في الشكل (11-4) من طبقة صاج خارجية مموجة أو مضلعة بسماكة لا تقل عن 0.7 mm وطبقة صاج داخلية سماكتها لا تقل عن 0.4 mm مع بعض التضليع. توضع بين طبقتي الصاج طبقة من الصوف الزجاجي لتؤمّن عازلية حرارية لا تقل عن $0.44\ W/m^2\ C°$ وتكون سماكة طبقة العزل عادة حوالي 80 mm



الشكل (11-4)

يتم تركيب طبقة الصاج الداخلية وتثبيتها أولاً على الجوائز الثانوية أو سكك الجدران ثم يتم تركيب عناصر على شكل Z لتحديد المسافة بين طبقتي الصاج وجمعهما مع بعض ثم يتم فرد طبقات العزل ويركب بعدها طبقة الصاج الخارجية بواسطة براغي لكما في الشكل (11-4). شروط العزل المائي تتطلب أن لا تقل زاوية ميل التغطية عن 4°

11-2-2 طبقات تغطية من ألواح مركّبة Composite panels

تُعتبر من أهم نظم التغطية المتطورة والتي تؤمّن حلاً لأغلب مشاكل التغطية المعدنية حيث يتم حقن المادة العازلة الرغوية (foam) بين طبقتي الصاج في المعمل تحت ضغط محدد لتملأ كامل الفراغ بين طبقتي الصاج فتعمل المادة العازلة بعد تصلبها بشكل مشترك مع صفيحتي الصاج فينتج ألواحاً صلبة قادرة على تحمل الأحمال الخارجية. وعليه تحدد مقاومة الألواح بالعمل المشترك لطبقتي الصاج والمادة العازلة المحقونة بينهما وتحدد الشركات المصنعة لمثل هذه الألواح الأحمال الحية التي يمكن تحملها، ويبين الشكل (11-5) نموذجاً من هذه الألواح.



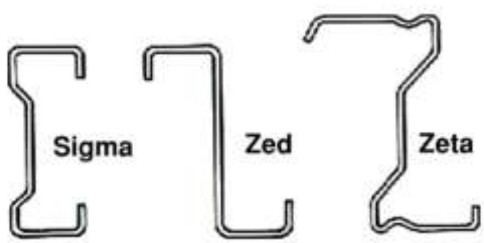
الشكل (11-5)

وفي كل الأحوال يجب أن يوفر مصنعوا طبقات التغطية كافة المعلومات الفنية من أبعاد وسماكات وأوزان وطرق تركيب ووسائط تثبيت على العناصر الثانوية والأحمال التي يمكن أن تتحملها طبقات التغطية بدلالة المسافة بين العناصر الفولاذية الساندة لها وكذلك الميل الأدنى التي تركب به وطرق وصل هذه الطبقات لتحقيق مستوى الكتامة المطلوب.

11-3 العناصر الثانوية Secondary elements

العناصر الثانوية هي العناصر التي تسند طبقات التغطية سواء في الأسقف أو الجدران وتنقل حمولاتها إلى العناصر الإنشائية الرئيسية. ويبين الشكل (11-1) هذين النوعين من العناصر الثانوية، ويقضي حسن أداء طبقات التغطية وشروط التقييد الجانبي للعناصر الإنشائية الرئيسية أن يكون التباعد بين العناصر الثانوية بين 1.2 – 2 m

تُصنع مقاطع العناصر الثانوية بأشكال مختلفة من الفولاذ المدرفل على الحامي أو من الصاج المشكل على البارد كما هو مبين في الشكل (11-6). وبينت الدراسات والتطبيقات العملية أن المقاطع المشكّلة على البارد هي الأكثر اقتصادية. وكان أول هذه المقاطع إنتاجاً المقطع على شكل Z حيث تم استخدام المادة بشكل فعّال ولكن محاوره الرئيسية تميل على مستوي الجسد، فإذا تعرض إلى عزم انعطاف في مستوي الجسد تنتج انتقالات خارج مستوي الجسد وإذا تم تقييد هذه الانتقالات تولدت قوى خارج مستوي الجسد. ولهذه الأسباب تم تطوير مقطع على شكل Σ حيث يمر مستوي الأحمال المطبقة من مركز القص. وفي كل الأحوال يقدم مصنعوا هذه المقاطع كافة المعلومات اللازمة عن هذه المقاطع والتي تمكن المصممين من اختيار المناسب منها.



الشكل (11-6)

11-4 الإطارات الرئيسية Primary frames

تسند الإطارات الرئيسية العناصر الثانوية التي تحمل صفائح التغطية حيث تنتقل الأحمال المطبقة على صفائح التغطية إلى العناصر الثانوية ومنها إلى الإطارات الرئيسية التي تقوم بدورها إلى نقلها إلى الأساسات. ويبين الشكل (11-7) أبسط أنواع الإطارات حيث يتألف من جائز أفقي وعمودين،



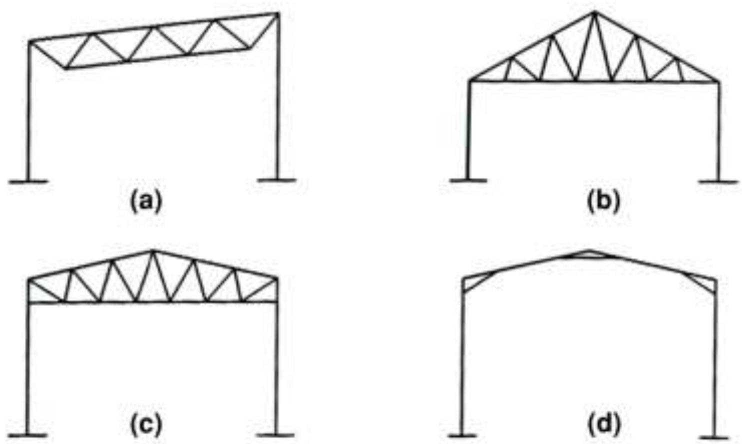
Simplest single-storey structure

الشكل (11-7)

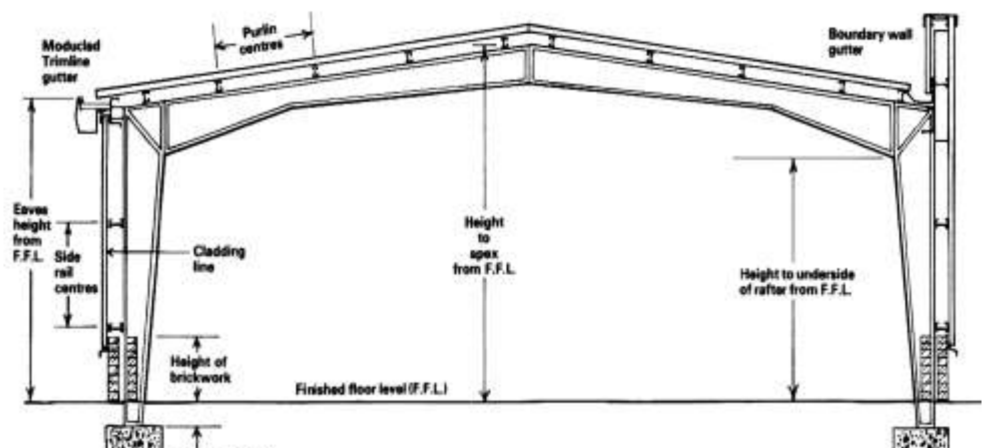
ولكن ضرورات تصريف مياه الأمطار تقتضي أن يكون للسطح ميلاً محدداً يتم تأمينه إذا كان المجاز صغيراً (أقل من 10m) عن طريق إنهاءات السطح، أما إذا كان المجاز كبيراً يؤمّن الميل بجعل الجائز مائلاً علىالأفق، لكن المتطلبات المعمارية تقتضي أن يكون هذا الميل بحده الأدنى وزاوية الميل الأكثر شيوعاً هي حوالي 6° . ويبين الشكل (11-8) أكثر أنواع الإطارات شيوعاً.

تكون جملة الجائز الشبكي والعمودين المبينة في الأشكال (11-8a-c) مفيدةً واقتصاديةً عندما يكون المجاز كبيراً، حيث تتألف عناصر جسد الجائز الشبكي من زوايا مدرفلة على الحامي، أما الوتران العلوي والسفلي فيتألفان من زوايا أيضاً أو مقاطع T لأن وصل مقاطع T أسهل حيث لا تحتاج إلى صفائح وصل. أما إذا

كانت الأحمال المطبّقة على الجائز الشبكي كبيرة فيمكن أن تكون عناصر الجائز الشبكي مقاطع مجراية أو I مدرفلة على الحامي حسب الحاجة.



الشكل (11-8) أكثر أنواع الإطارات شيوعاً.



الشكل (11-9) الإطارالبابي (Portal frame)

تعدّ جملة الإطار البابي (Portal frame) المبينة في الشكلين (11-8d, 9) من أكثر الجمل شيوعاً في الأبنية وحيدة الطابق حيث يمكن أن يبلغ مجازه (60m)، ويتكوّن الإطار تقليدياً من مقاطع I قياسية مدرفلة على الحامي ولكن الفهم المتزايد لتصرف العناصر النحيفة أدى إلى الانتشار الواسع لاستخدام العناصر الصفائحية متغيرة العطالة في أعمدة وجوائز الجملة وذلك بغية الوصول إلى حلول اقتصادية. تتراوح المسافة بين الإطارات بين (6 – 8m) ويتراوح ارتفاع الإطار إلى نقطة اتصال الجائز بالعمود (الركبة) بين (6 – 15m). ويكون الإطار المتمفصل مع القاعدة أثقل من الإطار الموثوق مع قاعدته ولكن أساس الأخير أكبر بكثير مما يجعل الإطار المتمفصل مع القاعدة أكثر اقتصادية في النتيجة.

الفصل الثاني عشر
الأحمال على المنشآت

12 - 1 الأحمال الميتة Dead loads

يشتمل هذا النوع من الأحمال على الوزن الذاتي للعناصر وعلى الوزن الذاتي لكل الأجزاء الثابتة من المنشأ مثل طبقات التغطية للأسقف والجدران والإنهاءات والقواطع الثابتة .... وتحسب هذه الأوزان إما اعتماداً على الوزن النوعي للمواد المكونة لها أو تؤخذ من نشرات الشركات المصنعة لها، ويبين الجدول التالي الوزن النوعي لبعض مواد البناء الأساسية:

المـــــادة	الوزن النوعي (kg/m^3)	الوزن النوعي (kN/m^3)
الفولاذ	7850	77
الخرسانة المسلحة	2420	23.7
أعمال الآجر	2000–2300	20 –23
أعمال البلوك	1400-1800	14-18
الخشب	500 –900	5–9

12-2 الأحمال الحية Imposed loads

تشتمل الأحمال الحية على أوزان الثلج على الأسقف النهائية وعلى أوزان الأشخاص والأثاث وعلى التجهيزات والآلات وعلى أوزان القواطع القابلة للحركة. يعتمد تقدير هذه الأحمال على دراسات إحصائية في مجال هندسة البناء انطلاقاً من الوظيفة المرجوة من البناء. ويبين الجدول التالي الأحمال الحية لبعض أنواع الأبنية:

نوع البنـــاء	الحمل الحي (kN/m^2)
أبنية سكنية	1.5
أبنية مكاتب (حسب الاستخدام)	5 – 2.5
أبنية تعليمية	3.0
أبنية مسارح (ذات مقاعد ثابتة)	4.0
أبنية مستودعات	2.4 لكل متر ارتفاع تخزين
أبنية صناعية	5

ولتفصيل أكثر في الأحمال الحية لا بد من العودة إلى المواصفة البريطانية BS 6399: Part 1 لعام 1996

أما حمولات الأسطح النهائية فلا تتبع نوعية المنشأ وإنما تتبع لطريقة استخدامها وميلها:

- تقدر الحمولة الحية للأسطح الأفقية أوالمائلة حتى (10°) والتي من الممكن الوصول إليها (المنشآت المجهزة بأدراج حتى سقفها) بـــ $(1.5\,kN/m^2)$ متضمنة وزن الثلج مقاسة على المسقط الأفقي للسطح، أو بحمولة مقدارها $(1.8\,kN)$ مركزة على مساحة مربعة ضلعها (300 mm) موضعة في الأمكنة التي تعطي أسوأ حالات التحميل. تؤخذ في الحساب إحدى الحمولتين (الموزعة أو المركّزة) والتي تعطي اسوأ حالة في الإجهادات على العناصر الحاملة.
- تقدر الحمولة الحية على الأسطح الأفقية أو المائلة حتى (30°) والتي لا يمكن الصعود إليها (غير مجهزة بأدراج حتى الأسقف) إلا لحالات الإصلاح والتنظيف بـــ $(0.75\,kN/m^2)$ متضمنة وزن الثلج مقاسة على المسقط الأفقي، أو بحمولة مركزة مقدارها $(0.9\,kN)$ على مساحة

مربعة ضلعها (300 mm) موضعة في الأمكنة التي تعطي أسوأ حالات التحميل. تؤخذ في الحساب إحدى الحمولتين والتي تعطي حالة أسوأ في الإجهادات على العناصر الحاملة.

- لا حاجة لاعتبار أية حمولة حية للأسطح التي تميل ع لى الأفق بزاوية أكبر من (75°)، أما للأسطح التي تكون زاوية ميلها بين (30°و 75°) فيمكن إيجاد مقدار حمولتها الحية بواسطة الاستقراء الخطي بين قيمتي $\left(0.75\,kN/m^2\right)$ والصفر وللحمولات المركّزة بين $\left(0.9\,kN\right)$ والصفر.

12-3 أحمال الرياح Wind loads

تسبب الرياح أحمالاً ديناميكية على الأبنية في كل الاتجاهات وتدوم فترة تتراوح من أجزاء الثانية إلى بضع دقائق أحياناً، وتتراوح شدتها من صغيرة إلى مدمرة. ولأغراض تصميمية من الضروري استبدال هذه الأحمال الديناميكية بأحمال ستاتيكية مكافئة. تبدأ عملية إيجاد هذه الأحمال المكافئة بتحديد سرعة رياح تصميمية $\left(V_s\right)$ للمنطقة قيد الدراسة ومن ثم تحويل هذه السرعة إلى ضغط ديناميكي $\left(q\right)$على سطوح المنشأ باستخدام العلاقة التالية:

$$q = \frac{1}{2}\rho V_s^2 \qquad (12\text{-}1)$$

حيث:

$\rho = 1.226\,kg/m^3$ كتلة واحدة الحجوم من الهواء حرارتها 15°c تحت ضغط جوي قدره 76 cm زئبق

نعوض قيمة ρ في المعادلة (12-1) ينتج

$$q = 0.613\ V_s^2 \qquad (12\text{-}2)$$

على أن تقدر V_s بالمتر في الثانية (m/s) وأن تقدر q بـ $\left(N/m^2\right)$

12-3-1 سرعة الرياح التصميمية

تحدد سرعة الرياح التصميمية للمنطقة قيد الدراسة وفق العلاقة التالية

$$V_s = V\,S_1\,S_2\,S_3 \qquad (12\text{-}3)$$

حيث:

V سرعة الرياح الأساسية وهي ثاني سرعة عاصفة من الرياح مدتها ثلاث ثوانٍ يتعرض لها المنشأ خلال خمسين عاماً وتحدد بعمليات إحصائية على سجلات سرعة الرياح المدونة في محطات الرصد الجوي حيث يتم القياس على ارتفاع 10 m فوق سطح الأرض في مناطق مستوية مفتوحة دون عوائق.

S_1 المعامل الطبوغرافي يعكس التغيرات المحلية الكبيرة في طبوغرافية سطح الأرض ويحدد من الجدول (12-1)

الجدول 12-1 المعامل الطبوغرافي S_1

الوضع الطبوغرافي	قيمة S_1
a) سفوح الهضاب المكشوفة جداً والقمم حيث تتسارع الرياح والأودية التي يحدث فيها دوامات هوائية.	1.1
b) الأودية المغلقة والتي جوانبها ذات ميل شديد والتي تعتبر محمية من الرياح.	0.9
c) كل الحالات الأخرى عدا (a) و (b)	1.0

S_2 معامل الخشونة ويحدد وفقاً لخشونة سطح الأرض وتغير سرعة الرياح مع الارتفاع فوق سطح الأرض وحجم البناء أو جزء البناء قيد الدراسة وتُقسّم خشونة سطح الأرض إلى أربع فئات كما هو مبين في الجدول التالي:

رقم الفئة	اسم الفئة	أمثلة على الفئة
1	أرياف مفتوحة دون عوائق	المستنقعات، السبخات، المطارات، المناطق الساحلية المنبسطة، المزارع غير المحاطة بصادات رياح أو أسوار.
2	أرياف مع صادّات رياح متفرقة	الأرياف والمزارع المحاطة بصادات الرياح أو الأسوار.
3	أرياف مع العديد من صادّات الرياح والمدن الصغيرة وضواحي المدن الكبيرة	الحدائق العامة المسورة، مناطق الغابات، المدن الصغيرة وضواحيها، ضواحي المدن الكبرى حيث ارتفاع المستوي العام للأسطحة والعوائق حوالي 10 m.
4	مناطق ذات عوائق كبيرة ومتعددة	مراكز المدن ذات الأبنية العالية والمتقاربة حيث ارتفاع مستوى الأسطحة أكبر أو يساوي 25m.

وكذلك تم تقسيم أنواع الأبنية وتغطيتها وفق الأصناف الثلاث التالية:

الصنف	شمول الصنف
A	يشمل كل أجزاء طبقات التغطية، وأعمال الزجاج، وعناصر التثبيت
B	الأبنية والمنشآت التي لا يزيد بعدها الأفقي الأعظمي أو بعدها الشاقولي الأعظمي عن 50m
C	الأبنية والمنشآت خلاف الصنف B

تحدد قيمة المعامل S_2 من الجدول (12-2) بدلالة خشونة سطح الأرض وصنف البناء كما جاء في الفقرتين السابقتين وكذلك بدلالة الارتفاع فوق سطح الأرض حيث يجب أخذ الارتفاع إلى أعلى نقطة من المنشأ، أو يتم تجزئة ارتفاع المنشأ إلى أجزاء يحدد لكل جزء منه قيمة للمعامل S_2 وذلك وفقاً لارتفاع أعلى نقطة فيه عن سطح الأرض. ويحدد الارتفاع فوق سطح الأرض بالفرق بين منسوب النقطة قيد الدراسة والمنسوب العام للأرض في جوار البناء وذلك على اعتبار عدم وجود شروط غير طبيعية، أما في الأحوال غير الطبيعية كوجود جروف أو منحدرات لا بد من العودة إلى الكود البريطاني CP3: Chapter V: Part 2

S_3 معامل إحصائي يتعلق بدرجة الأمان المطلوبة والمدة الزمنية التي سيتعرض لها المنشأ للرياح ويؤخذ مساوياً الواحد في حالات أحمال الرياح الطبيعية على المنشآت والمباني المنتهية.

12-3-2 ضغط الرياح

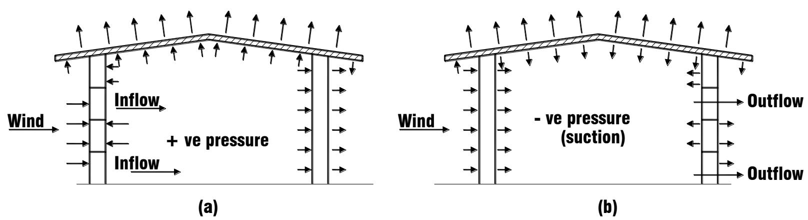
يعتمد ضغط الرياح الكلي على الجدران أو الأسقف على الفرق بين الضغط على الوجه الخارجي والضغط على الوجه الداخلي وعليه يحدد الضغط الكلي على أية نقطة من المنشأ وفق العلاقة التالية:

$$p = \left(C_{pe} - C_{pi}\right) q \qquad (12\text{- }4)$$

حيث: C_{pe} معامل الضغط الخارجي: تحدد قيمته على جدران المنشأ من الجدول (12-3) وعلى سقف المنشأ من الجداول (12-4,5-8) ويكون موجباً عندما يكون اتجاه الضغط من الفراغ المحيط إلى داخل المنشأ ويأخذ إشارة سالبة عندما يكون اتجاه الضغط عكس ذلك (مص).

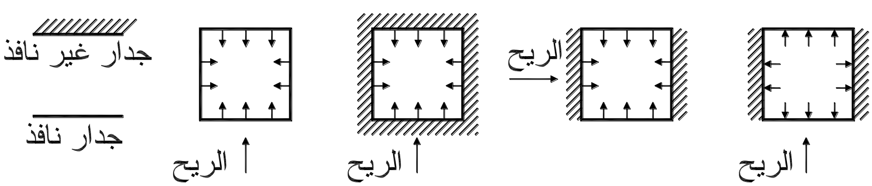
C_{pi} معامل الضغط الداخلي: نظراً لأن البناء لا يمكن أن يكون محكم الإغلاق ويمكن أن يكون مفتوحاً جزئياً بسبب النوافذ أو الأبواب أو فتحات

التهوية .... فإن السطوح الداخلية للبناء ستتعرض إلى ضغوط موجبة أو سالبة (مص) وذلك طبقاً لوجود الفتحات على جدار البناء المواجه لاتجاه الرياح (Windward) أو على واجهة البناء الخلفية (Leeward)، فعندما توجد الفتحات على الجدار المواجه للرياح فإن الضغط الداخلي سيزداد وبالتالي فإن حمل الرياح على السقف وعلى الجدار الخلفي للبناء سيزداد كما هو مبين في الشكل (12-1a)، وعلى العكس عندما تتوضع الفتحات على الواجهة الخلفية للبناء فإن الضغط الداخلي يتناقص مما يؤدي إلى زيادة في حمل الرياح على الجدار المواجه للرياح كما هو مبين في الشكل (12-1b).



الشكل (12-1) الضغط الداخلي

عملياً تحديد نفوذية أي جدار ليس سهلاً ولكن الشيء المهم لأغراض التصميم هو تحديد حالة التراكب الأسوأ بين الضغط الخارجي والضغط الداخلي المحتملة الحدوث على الجدران أو السقف. ويبين الشكل (12-2) قيم معامل الضغط الداخلي وفقاً لنفوذية الجدران واتجاه الرياح.



$C_{pi} = -0.3$ $C_{pi} = -0.3$ $C_{pi} = -0.3$ $C_{pi} = +0.2$

الشكل (12-2) معامل الضغط الداخلي

12 - 4 حساب قوة الرياح الكلية

تحسب قوة الرياح الكلية F المطبقة على المنشأ باتجاه الريح وذلك بضرب الضغط الديناميكي q بمساحة واجهة البناء الفعالة A_e وبمعامل القوة C_f أي:

$$F = C_f\ q\ A_e \qquad (12\text{-}5)$$

يحدد معامل القوة C_f من الجدول (12-9) وذلك بدلالة أبعاد البناء. تحدد قيمة C_f لبناء ككل عندما يتم تجزيئ واجهة البناء إلى مساحات جزئية بغية حساب قوة الرياح المطبقة على أي جزء.

12- 5 قوة السحب نتيجة الاحتكاك Frictional drag

في بعض الأبنية ذات الشكل الخاص تضاف إلى القوى الناتجة عن الرياح المحسوبة وفق الفقرتين (12-3,4) قوة سحب F' ناتجة عن احتكاك الرياح بالبناء. ففي الأبنية المستطيلة تكون هذه القوة ذات قيمة ملموسة عندما تكون نسبة أبعاد البناء d/b أو d/h أكبر من 4، حيث h ارتفاع البناء و b بُعد مسقط البناء العمودي على اتجاه الرياح و d بُعد مسقط البناء الموازي لاتجاه الرياح. تحدد القوة F' وفق إحدى العلاقتين التاليتين

$$F' = C_{f'}\ qb(d-4h) + C_{f'}\ q2h(d-4h) \qquad (12\text{-}6) \qquad \text{عندما } h \le b$$

$$F' = C_{f'}\ qb(d-4b) + C_{f'}\ q2h(d-4b) \qquad (12\text{-}7) \qquad \text{عندما } h \ge b$$

حيث:

$C_{f'}$ معامل الاحتكاك ويتعلق بمدى خشونة طبقات التغطية ويحدد من الجدول التالي

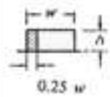
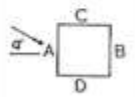
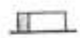
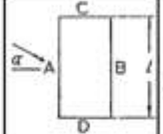
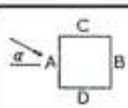
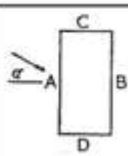
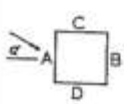
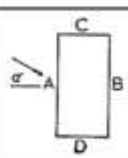
$C_{f'}$	خشونة طبقات التغطية
0.01	سطوح ملساء بدون تمويج أو تضليع أو أعصاب متعامدة مع اتجاه الريح
0.02	سطوح ذات تمويج متعامد مع اتجاه الريح
0.04	سطوح ذات أضلاع أو أعصاب متعامدة مع اتجاه الريح

يمثل الحد الأول في كلا المعادلتين (12-7 , 12-6) قوة السحب الناتجة عن الاحتكاك مع السقف، أما الحد الثاني فيمثل قوة السحب الناتجة عن الاحتكاك مع الجدران. كُتب الحدان بشكل منفصل وذلك لإعطاء إمكانية حساب $C_{f'}$ و q لكل من السقف والجدران بشكل مستقل.

Ground roughness, building size and height above ground, factor S_2 الجدول (12-2)

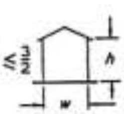
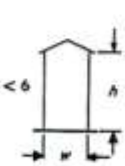
H	(1) Open country with no obstructions			(2) Open country with scattered windbreaks			(3) Country with many windbreaks; small towns; outskirts of large cities			(4) Surface with large and frequent obstructions, e.g. city centres		
	Class			Class			Class			Class		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
m												
3 or less	0.83	0.78	0.73	0.72	0.67	0.63	0.64	0.60	0.55	0.56	0.52	0.47
5	0.88	0.83	0.78	0.79	0.74	0.70	0.70	0.65	0.60	0.60	0.55	0.50
10	1.00	0.95	0.90	0.93	0.88	0.83	0.78	0.74	0.69	0.67	0.62	0.58
15	1.03	0.99	0.94	1.00	0.95	0.91	0.88	0.83	0.78	0.74	0.69	0.64
20	1.06	1.01	0.96	1.03	0.98	0.94	0.95	0.90	0.85	0.79	0.75	0.70
30	1.09	1.05	1.00	1.07	1.03	0.98	1.01	0.97	0.92	0.90	0.85	0.79
40	1.12	1.08	1.03	1.10	1.06	1.01	1.05	1.01	0.96	0.97	0.93	0.89
50	1.14	1.10	1.06	1.12	1.08	1.04	1.08	1.04	1.00	1.02	0.98	0.94
60	1.15	1.12	1.08	1.14	1.10	1.06	1.10	1.06	1.02	1.05	1.02	0.98
80	1.18	1.15	1.11	1.17	1.13	1.09	1.13	1.10	1.06	1.10	1.07	1.03
100	1.20	1.17	1.13	1.19	1.16	1.12	1.16	1.12	1.09	1.13	1.10	1.07
120	1.22	1.19	1.15	1.21	1.18	1.14	1.18	1.15	1.11	1.15	1.13	1.10
140	1.24	1.20	1.17	1.22	1.19	1.16	1.20	1.17	1.13	1.17	1.15	1.12
160	1.25	1.22	1.19	1.24	1.21	1.18	1.21	1.18	1.15	1.19	1.17	1.14
180	1.26	1.23	1.20	1.25	1.22	1.19	1.23	1.20	1.17	1.20	1.19	1.16
200	1.27	1.24	1.21	1.26	1.24	1.21	1.24	1.21	1.18	1.22	1.21	1.18

Pressure coefficients C_{pe} for the walls of rectangular clad buildings (12-3) الجدول

Building height ratio	Building plan ratio	Elevation	Plan	Wind angle α	C_{pe} for surface A	B	C	D	Local C_p
				degrees					
$\frac{h}{w} \leq \frac{1}{2}$	$1 < \frac{l}{w} \leq \frac{3}{2}$			0	+0.7	−0.2	−0.5	−0.5	−0.8
				90	−0.5	−0.5	+0.7	−0.2	
	$\frac{3}{2} < \frac{l}{w} < 4$			0	+0.7	−0.25	−0.6	−0.6	−1.0
				90	−0.5	−0.5	+0.7	−0.1	
$\frac{1}{2} < \frac{h}{w} \leq \frac{3}{2}$	$1 < \frac{l}{w} \leq \frac{3}{2}$			0	+0.7	−0.25	−0.6	−0.6	−1.1
				90	−0.6	−0.6	+0.7	−0.25	
	$\frac{3}{2} < \frac{l}{w} < 4$			0	+0.7	−0.3	−0.7	−0.7	−1.1
				90	−0.5	−0.5	+0.7	−0.1	
$\frac{3}{2} < \frac{h}{w} < 6$	$1 < \frac{l}{w} \leq \frac{3}{2}$			0	+0.8	−0.25	−0.8	−0.8	−1.2
				90	−0.8	−0.8	+0.8	−0.25	
	$\frac{3}{2} < \frac{l}{w} < 4$			0	+0.7	−0.4	−0.7	−0.7	−1.2
				90	−0.5	−0.5	+0.8	−0.1	

NOTE. h is the height to eaves or parapet, l is the greater horizontal dimension of building and w is the lesser horizontal dimension of a building

Pressure coefficients C_{pe} for pitch roofs of rectangular clad buildings (12-4) الجدول

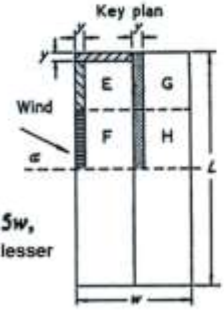
Building height ratio	Roof angle	Wind angle α 0° EF	Wind angle α 0° GH	Wind angle α 90° EG	Wind angle α 90° FH	Local coefficients			
	degrees								
$\frac{h}{w} \leq \frac{1}{2}$ 	0	−0.8	−0.4	−0.8	−0.4	−2.0	−2.0	−2.0	—
	5	−0.9	−0.4	−0.8	−0.4	−1.4	−1.2	−1.2	−1.0
	10	−1.2	−0.4	−0.8	−0.6	−1.4	−1.4		−1.2
	20	−0.4	−0.4	−0.7	−0.6	−1.0			−1.2
	30	0	−0.4	−0.7	−0.6	−0.8			−1.1
	45	+0.3	−0.5	−0.7	−0.6				−1.1
	60	+0.7	−0.6	−0.7	−0.6				−1.1
$\frac{1}{2} < \frac{h}{w} \leq \frac{3}{2}$ 	0	−0.8	−0.6	−1.0	−0.6	−2.0	−2.0	−2.0	—
	5	−0.9	−0.6	−0.9	−0.6	−2.0	−2.0	−1.5	−1.0
	10	−1.1	−0.6	−0.8	−0.6	−2.0	−2.0	−1.5	−1.2
	20	−0.7	−0.5	−0.8	−0.6	−1.5	−1.5	−1.5	−1.0
	30	−0.2	−0.5	−0.8	−0.8	−1.0			−1.0
	45	+0.2	−0.5	−0.8	−0.8				
	60	+0.6	−0.5	−0.8	−0.8				
$\frac{3}{2} < \frac{h}{w} < 6$ 	0	−0.7	−0.6	−0.9	−0.7	−2.0	−2.0	−2.0	—
	5	−0.7	−0.6	−0.8	−0.8	−2.0	−2.0	−1.5	−1.0
	10	−0.7	−0.6	−0.8	−0.8	−2.0	−2.0	−1.5	−1.2
	20	−0.8	−0.6	−0.8	−0.8	−1.5	−1.5	−1.5	−1.2
	30	−1.0	−0.5	−0.8	−0.7	−1.5			
	40	−0.2	−0.5	−0.8	−0.7	−1.0			
	50	+0.2	−0.5	−0.8	−0.7				
	60	+0.5	−0.5	−0.8	−0.7				

NOTE 1. h is the height to eaves or parapet and w is the lesser horizontal dimension of a building.

NOTE 2. The pressure coefficient on the underside of any roof overhang should be taken as that on the adjoining wall surface.

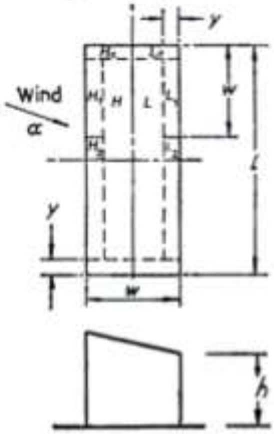
Where no local coefficients are given the overall coefficients apply

NOTE 3. For hipped roofs the local coefficient for the hip ridge may be conservatively taken as the appropriate ridge value.



$y = h$ or $0.15w$, whichever is the lesser

Pressure coefficients C_{pe} for monopitch roofs of rectangular clad buildings with $h/w < 2$ الجدول (12-5)



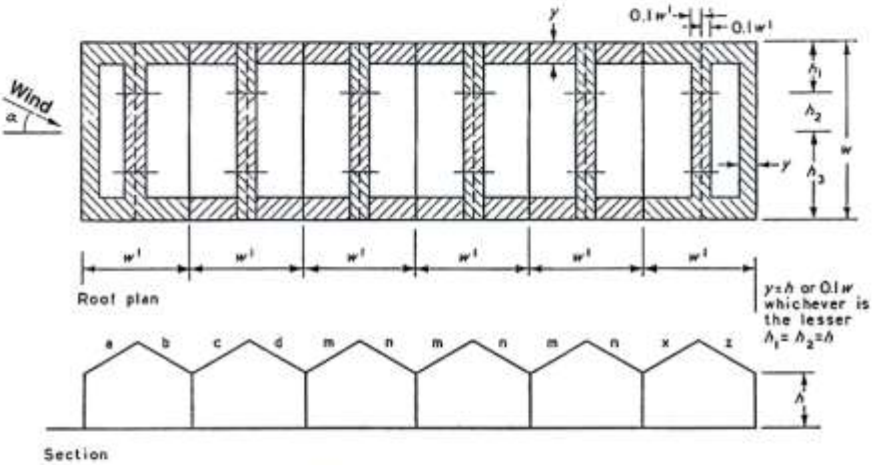
$y = h$ or $0.15\,w$, whichever is the lesser

NOTE. Area H and area L refer to the whole quadrant.

Roof angle	Wind angle α										Local C_{pe}					
	0°		45°		90°		135°		180°							
degree	H	L	H	L	H & L (Applies to length w/2 from windward end)	H & L (Applies to remainder)	H	L	H	L	H_1	H_2	L_1	L_2	H_e	L_e
5	−1.0	−0.5	−1.0	−0.9	−1.0	−0.5	−0.9	−1.0	−0.5	−1.0	−2.0	−1.5	−2.0	−1.5	−2.0	−2.0
10	−1.0	−0.5	−1.0	−0.8	−1.0	−0.5	−0.8	−1.0	−0.4	−1.0	−2.0	−1.5	−2.0	−1.5	−2.0	−2.0
15	−0.9	−0.5	−1.0	−0.7	−1.0	−0.5	−0.6	−1.0	−0.3	−1.0	−1.8	−0.9	−1.8	−1.4	−2.0	−2.0
20	−0.8	−0.5	−1.0	−0.6	−0.9	−0.5	−0.5	−1.0	−0.2	−1.0	−1.8	−0.8	−1.8	−1.4	−2.0	−2.0
25	−0.7	−0.5	−1.0	−0.6	−0.8	−0.5	−0.3	−0.9	−0.1	−0.9	−1.8	−0.7	−0.9	−0.9	−2.0	−2.0
30	−0.5	−0.5	−1.0	−0.6	−0.8	−0.5	−0.1	−0.6	0	−0.6	−1.8	−0.5	−0.5	−0.5	−2.0	−2.0

NOTE. h is the height to eaves at lower side, L is the greater horizontal dimension of a building and w is the lesser horizontal dimension of a building

Pressure coefficients C_{pe} for pitch roofs of multi-span buildings (12-6) الجدول
(all spans equal) with $h \not> w'$



Roof angle	Wind angle α	First span a	First span b	First intermediate span c	First intermediate span d	Other intermediate spans m	Other intermediate spans n	End span x	End span z	Local coefficient (cross-hatched)	Local coefficient (hatched)
degrees	degrees										
5	0	−0.9	−0.6	−0.4	−0.3	−0.3	−0.3	−0.3	−0.3	−2.0	−1.5
10		−1.1	−0.6	−0.4	−0.3	−0.3	−0.3	−0.3	−0.4		
20		−0.7	−0.6	−0.4	−0.3	−0.3	−0.3	−0.3	−0.5		
30		−0.2	−0.6	−0.4	−0.3	−0.2	−0.3	−0.2	−0.5		
45		+0.3	−0.6	−0.6	−0.4	−0.2	−0.4	−0.2	−0.5		

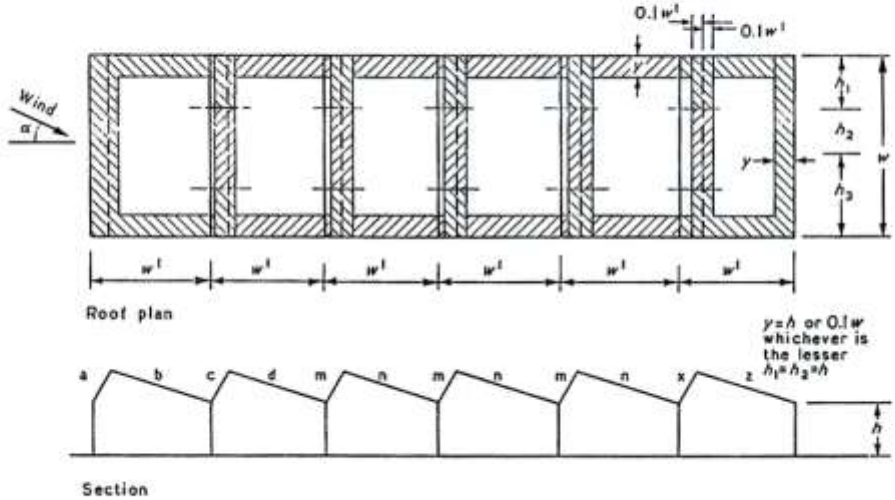
(Local coefficients −2.0 and −1.5 apply to all roof angles 5 to 45.)

Roof angle	Wind angle α	Distance h_1	h_2	h_3
degrees	degrees			
Up to 45	90	−0.8	−0.6	−0.2

Frictional drag: when wind angle α = 0° horizontal forces due to frictional drag are allowed for in the above values;
when wind angle α = 90° allow for frictional drag in accordance with 12-5

NOTE. Evidence on these buildings is fragmentary and any departures from the cases given should be investigated separately.

Pressure coefficients C_{pe} for saw-tooth roofs of multi-span buildings (all spans equal) with $h \ngtr w'$ (12-7) الجدول



Wind angle α	First span		First intermediate span		Other intermediate spans		End spans		Local coefficient	
	a	b	c	d	m	n	x	z	(cross-hatched)	(hatched)
degrees 0	+0.6	−0.7	−0.7	−0.4	−0.3	−0.2	−0.1	−0.3	−2.0	−1.5
180	−0.5	−0.3	−0.3	−0.3	−0.4	−0.6	−0.6	−0.1		

Wind angle α	Distance h_1	h_2	h_3
degrees 90	−0.8	−0.6	−0.2
270	Similarly, but handed		

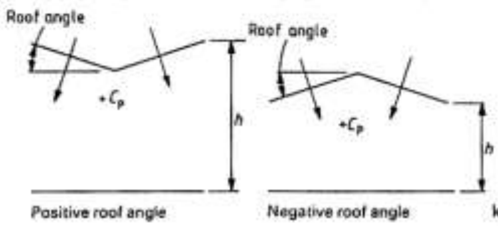
Frictional drag: when wind angle $\alpha = 0°$ horizontal forces due to frictional drag are allowed for in the above values;

when wind angle $\alpha = 90°$ allow for frictional drag in accordance with 12-5

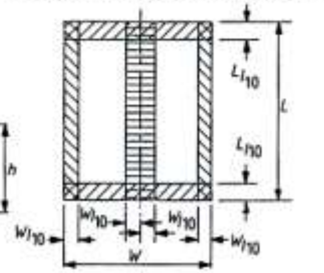
NOTE. Evidence on these buildings is fragmentary and any departures from the cases given should be investigated separately.

Pressure coefficients C_p for canopy roofs with $1/4 < h/w < 1$ and $1 < L/w < 3$

Duopich canopies (12-8a) الجدول



Section



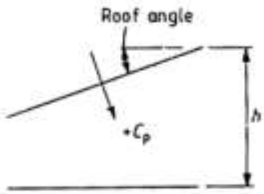
Key plan

Roof angle (degrees)	Solidity ratio	Maximum and minimum pressure coefficients: Overall coefficients	Local coefficients: □	Local coefficients: ▨	Local coefficients: ▧	Local coefficients: ☰
− 20	All values of Φ	+ 0.7	+ 0.8	+ 1.6	+ 0.6	+ 1.7
− 15		+ 0.5	+ 0.6	+ 1.5	+ 0.7	+ 1.4
− 10		+ 0.4	+ 0.6	+ 1.4	+ 0.8	+ 1.1
− 5		+ 0.3	+ 0.5	+ 1.5	+ 0.8	+ 0.8
+ 5		+ 0.3	+ 0.6	+ 1.8	+ 1.3	+ 0.4
+ 10		+ 0.4	+ 0.7	+ 1.8	+ 1.4	+ 0.4
+ 15		+ 0.4	+ 0.9	+ 1.9	+ 1.4	+ 0.4
+ 20		+ 0.6	+ 1.1	+ 1.9	+ 1.5	+ 0.4
+ 25		+ 0.7	+ 1.2	+ 1.9	+ 1.6	+ 0.5
+ 30		+ 0.9	+ 1.3	+ 1.9	+ 1.6	+ 0.7
− 20	Φ = 0	− 0.7	− 0.9	− 1.3	− 1.6	− 0.6
	Φ = 1	− 0.9	− 1.2	− 1.7	− 1.9	− 1.2
− 15	Φ = 0	− 0.6	− 0.8	− 1.3	− 1.6	− 0.6
	Φ = 1	− 0.8	− 1.1	− 1.7	− 1.9	− 1.2
− 10	Φ = 0	− 0.6	− 0.8	− 1.3	− 1.5	− 0.6
	Φ = 1	− 0.8	− 1.1	− 1.7	− 1.9	− 1.3
− 5	Φ = 0	− 0.5	− 0.7	− 1.3	− 1.6	− 0.6
	Φ = 1	− 0.8	− 1. 1.2	− 1.7	− 1.9	− 1.4
+ 5	Φ = 0	− 0.6	− 0.6	− 1.4	− 1.4	− 1.1
	Φ = 1	− 0.9	− 1.3	− 1.8	− 1.8	− 2.1
+ 10	Φ = 0	− 0.7	− 0.7	− 1.5	− 1.4	− 1.4
	Φ = 1	− 1.1	− 1.4	− 2.0	− 1.8	− 2.4
+ 15	Φ = 0	− 0.8	− 0.9	− 1.7	− 1.4	− 1.8
	Φ = 1	− 1.2	− 1.5	− 2.2	− 1.9	− 2.8
+ 20	Φ = 0	− 0.9	− 1.2	− 1.8	− 1.4	− 2.0
	Φ = 1	− 1.3	− 1.7	− 2.3	− 1.9	− 3.0
+ 25	Φ = 0	− 1.0	− 1.4	− 1.9	− 1.4	− 2.0
	Φ = 1	− 1.4	− 1.9	− 2.4	− 2.1	− 3.0
+ 30	Φ = 0	− 1.0	− 1.4	− 1.9	− 1.4	− 2.0
	Φ = 1	− 1.4	− 2.1	− 2.6	− 2.2	− 3.0

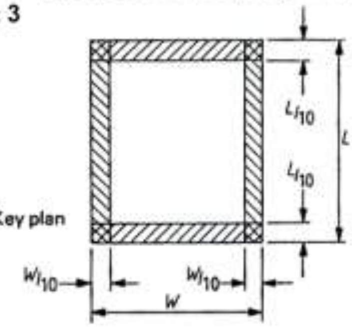
Each slope of a duopitch canopy should be able to withstand forces using both the maximum and the minimum coefficients, and the whole canopy should be able to support forces using one slope at the maximum coefficient with the other slope at the minimum coefficient.

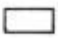
Pressure coefficients C_p for canopy roofs with 1/4 < h/w < 1 and 1 < L/w < 3

Monopich canopies (12-8b) الجدول



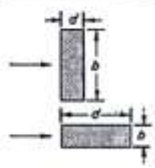
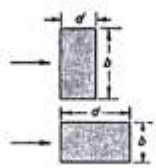
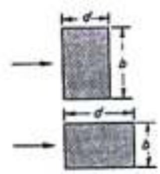
Section

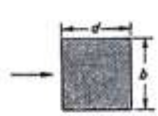


Roof angle (degrees)	Solidity ratio	Maximum and minimum pressure coefficients			
		Overall coefficients	Local coefficients		
					
0	All values of Φ	+ 0.2	+ 0.5	+ 1.8	+ 1.1
5		+ 0.4	+ 0.8	+ 2.1	+ 1.3
10		+ 0.5	+ 1.2	+ 2.4	+ 1.6
15		+ 0.7	+ 1.4	+ 2.7	+ 1.8
20		+ 0.8	+ 1.7	+ 2.9	+ 2.1
25		+ 1.0	+ 2.0	+ 3.1	+ 2.3
30		+ 1.2	+ 2.2	+ 3.2	+ 2.4
0	Φ = 0	− 0.5	− 0.6	− 1.3	− 1.4
	Φ = 1	− 1.0	− 1.2	− 1.8	− 1.9
5	Φ = 0	− 0.7	− 1.1	− 1.7	− 1.8
	Φ = 1	− 1.1	− 1.6	− 2.2	− 2.3
10	Φ = 0	− 0.9	− 1.5	− 2.0	− 2.1
	Φ = 1	− 1.3	− 2.1	− 2.6	− 2.7
15	Φ = 0	− 1.1	− 1.8	− 2.4	− 2.5
	Φ = 1	− 1.4	− 2.3	− 2.9	− 3.0
20	Φ = 0	− 1.3	− 2.2	− 2.8	− 2.9
	Φ = 1	− 1.5	− 2.6	− 3.1	− 3.2
25	Φ = 0	− 1.6	− 2.6	− 3.2	− 3.2
	Φ = 1	− 1.7	− 2.8	− 3.5	− 3.5
30	Φ = 0	− 1.8	− 3.0	− 3.8	− 3.6
	Φ = 1	− 1.8	− 3.0	− 3.8	− 3.6

For monopitch canopies the centre of pressure should be taken to act at 0.3w from the windward edge.
For duopitch canopies the centre of pressure should be taken to act at the centre of each slope.

Force coefficients C_f for rectangular clad buildings with flat roofs (12-9) الجدول (acting in the direction of the wind)

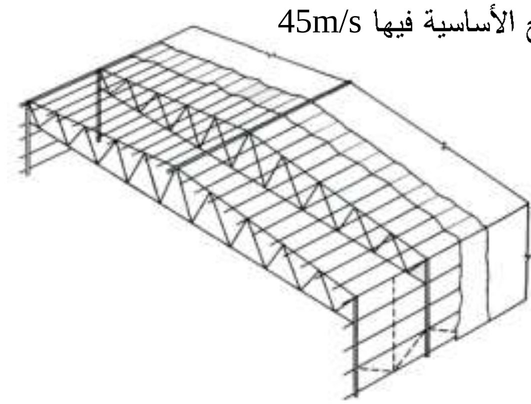
Plan shape	$\frac{l}{w}$	$\frac{b}{d}$	C_f for height / breadth ratio: Up to $\frac{1}{2}$	1	2	4	6
	⩾ 4	⩾ 4	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
		⩽ $\frac{1}{4}$	0.7	0.7	0.75	0.75	0.75
	3	3	1.1	1.2	1.25	1.35	1.4
		$\frac{1}{3}$	0.7	0.75	0.75	0.75	0.8
	2	2	1.0	1.05	1.1	1.15	1.2
		$\frac{1}{2}$	0.75	0.75	0.8	0.85	0.9
	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0.95	1.0	1.05	1.1	1.15
		$\frac{2}{3}$	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0

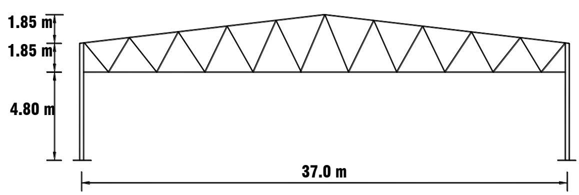
Plan shape	$\frac{l}{w}$	$\frac{b}{d}$	C_f for height / breadth ratio: Up to $\frac{1}{2}$	1	2	4	6	10	20
	1	1	0.9	0.95	1.0	1.05	1.1	1.2	1.4

NOTE. b is the dimension of the building normal to the wind, d is the dimension of the building measured in the direction of the wind, l is the greater horizontal dimension of a building and w is the lesser horizontal dimension of a building.

مثال : (12-1)

احسب أحمال الرياح على المبنى الصناعي المبين في الشكل أدناه علماً أن أبعاد مسقط البناء 90x37m والمسافة بين الإطارات الرئيسية 6m وزاوية ميل السقف 5.71° وأن البناء سيتم إشادته في مدينة صغيرة سرعة الرياح الأساسية فيها 45m/s





الحــــل :

* تحديد سرعة الرياح التصميمية والضغط الديناميكي

- المعامل الطبوغرافي $S_1 = 1$
- المعامل الإحصائي $S_3 = 1$
- معامل الخشونة: يحدد من الجدول (12-2) بلعتبار أن البناء سيشاد في مدينة صغيرة (الفئة 3) وأن أحد بعدي مسقط البناء أكبر من 50m (الصريف C) وأن ارتفاع البناء بين 5-10m فنجد:

الجدول 12-2

$S_2 = 0.69$

العلاقتين (12-3) (12-2)

- تحسب سرعة الرياح التصميمية والضغط الديناميكي كمايلي:

$V_s = V\,S_1\,S_2\,S_3 = 45 \text{ x } 1 \text{ x } 1 \text{ x } 0.69 = 31\,m/s$ (12-3)

$q = 0.613 V_s^2 = 0.613 \text{ x } 31^2 \text{ x} 10^{-3} = 0.59\,kN/m^2$ (12-2)

* تحديد معاملات الضغط وأحمال الإطار الرئيسي

- تحدد معاملات الضغط الخارجي على الجدران والسقف من الجدولين (12-3) و (12-4) على الترتيب باعتبار:

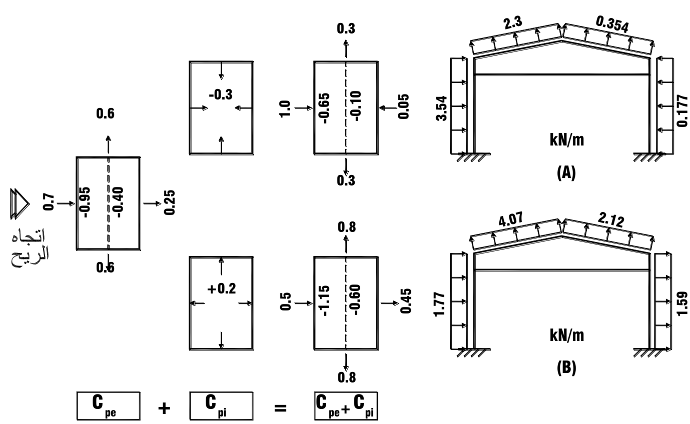
$h/w = 6.65/37 = 0.18 < 1/2$

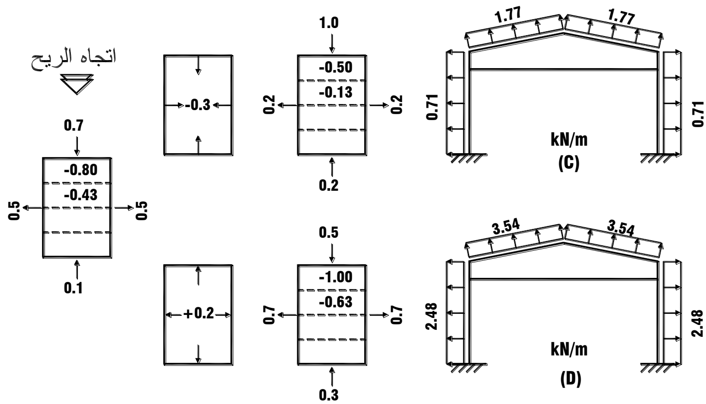
$3/2 < l/w = 90/37 = 2.43 < 4$

وزاوية ميل السقف $\theta = 5.71^\circ$

- تحدد معاملات الضغط الداخلي من الشكل (12-2) وتُراكب مع معاملات الضغط الخارجي لنتتج معاملات الضغط الكلي الأسواء على البناء ومنه حالات التراكب المبينة أدناه.

- تحدد أحمال الرياح الموزعة على كل من الإطارات الرئيسية بضرب الضغط الديناميكي بمعامل الضغط الكلي بالتباعد بين الإطارات فينتج حالات التحميل الأربعة المبينة أدناه.





* حساب قوة الرياح الكلية

– عندما تهب الرياح عمودياً على الواجهة الطويلة للبناء:

لابد من تحديد معامل خشونة جديد بالاعتماد على أن ارتفاع الواجهة الأمامية يساوي $4.8+1.85=6.65\,m$ وبالعودة للجدول (12-2) نجد:

$$S_2=0.63 \Rightarrow V_s=28.4\,m/s \Rightarrow q=0.49\,kN/m^2$$

ويحدد معامل القوة C_f بالعودة للجدول (12-9) وبالاعتماد على

الجدول 12-9

$$\left.\begin{array}{l} l/w=90/37=2.43 \\ b/d=90/37=2.43 \\ h/b=6.65/90=0.07 \end{array}\right\} \Rightarrow C_f=1.04$$

إذاً تحسب قوة الرياح الكلية التي يتعرض لها كل إطار رئيسي وفق العلاقة

العلاقة 12-5

$$F=C_f\;q\;A_e=1.04\text{ x }0.49\text{ x }(6\text{ x }6.65)=20.3\;kN$$

– عندما تكون الرياح موازية لمحور البناء:

يكون الارتفاع الوسطي لواجهة البناء الجانبية التي تهب عليها الرياح

يساوي $6.65+1.85/2=7.57\,m$ وعليه يكون معامل الخشونة والضغط الديناميكي مساويين تقريباً لما حُسب سابقاً أي $q=0.59\,kN/m^2$ ويحدد C_f كما في البند السابق ولكن بدلالة

الجدول 12-9

$$\left.\begin{aligned} l/w &= 2.43 \\ b/d &= 37/90 = 0.4 \\ h/b &= 7.57/37 = 0.2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow C_f = 0.72$$

إذاً تحسب قوة الرياح الكلية التي يتعرض لها البناء في هذا الاتجاه كما يلي:

$$F = C_f\ q\ A_e = 0.72 \text{ x } 0.59 \text{ x } (37 \text{ x} 7.57) = 119\ \ kN$$

ويجب أن تقاوم هذه القوة بجملة التربيط كما سنرى في فصل قادم

* حساب قوة السحب الناتجة عن الاحتكاك

- عندما تهب الرياح موازية لمحور البناء فإن $d/h=90/8.5=10.5$ و $d/b=90/37=2.43$ وعليه يجب أن تؤخذ قوة السحب بالحسبان وباعتبار أن طبقات التغطية المختارة لها أضلاع متعامدة مع اتجاه الرياح وبالعودة للفقرة (12-5) نجد أن معامل الاحتكاك $C_{f'}=0.04$ وعليه تحسب قوة السحب وفق العلاقة التالية:

العلاقة 12-6

$$F' = C_{f'}\left[\,b\left(d-4h_1\right)q_1 + 2h_2\left(d-4h_2\right)q_2\,\right]$$

حيث

$q_1 = 0.59\ \ kN/m^2$ الضغط الديناميكي على السطح

$q_2 = 0.49\ \ kN/m^2$ الضغط الديناميكي على الجدران

$h_1 = 8.5\,m$ ارتفاع أعلى نقطة في السقف

$h_2 = 6.65\,m$ ارتفاع أعلى نقطة في الجدران

$$F' = 0.04\left[37\,(90 - 4 \text{ x } 8.5)0.59 + 2 \text{ x } 6.65\,(90 - 4 \text{ x } 6.65)\,0.49\right]$$
$$= 65.4 \;\; kN$$

يجب أن تضاف هذه القوة إلى قوة الرياح الكلية المحسوبة في الفقرة السابقة وأن يقاوم مجموعهما بجملة التربيط

- عندما تهب الرياح عمودياً على محور البناء فإن

$$d/b = 37/90 = 0.41 \;,\; d/h = 37./8.5 = 4.4$$

وعليه يجب أن تؤخذ قوة السحب بالحسبان. وبما أن أعصاب طبقات التغطية لا تتعارض مع اتجاه الرياح وبالعودة للفقرة (5-12) نجد أن معامل الاحتكاك $C_{f'} = 0.01$ وبناءً على ذلك تحسب قوة السحب وفق العلاقة التالية

$$F' = C_{f'}\left[\,b\left(d - 4h_1\right)q_1 + 2h_2\left(d - 4h_2\right)q_2\,\right]$$

حيث

$h_1 = 8.5\,m$ ارتفاع أعلى نقطة في السقف

$h_2 = 7.57\,m$ الارتفاع الوسطي للجدار الجانبي الموازي للرياح

$$F' = 0.01\left[90\,(37 - 4 \text{ x } 8.5)0.59 + 2 \text{ x}7.57\;(37 - 4 \text{ x}7.57\,)\,0.49\right]$$
$$= 2.1 \;\; kN$$

نلاحظ في هذه الحالة أن قوة السحب صغيرة جداً بالمقارنة مع الحالة السابقة ولهذا تهمل قوة السحب على الأبنية وحيدة الفتحة عندما تهب الرياح عمودياً على محورها.

الفصل الثالث عشر

الجوائز الثانوية وسكك الجدران

Purlins and side rails

13 - 1 مقدمـــــة:

تُستعمَل المقاطع المشكّلة على البارد بشكل واسع كجوائز ثانوية أو سكك جدران، ويعتمد تصميم هذه المقاطع على نتائج تجارب تقوم بها الشركات الصانعة، ويبين الشكل (6-11) ثلاثة نماذج شائعة الاستعمال من هذه المقاطع، وتقوم هذه الشركات بتقديم نشرات فنية كاملة عن مقاطعها شاملة الأبعاد والخواص الهندسية والأحمال التي يمكن أن تتحملها والمجازات المناسبة لها.

ويمكن أن تُستعمل المقاطع المدرفلة على الحامي بل تُفضّل أحياناً كبديل عن المقاطع المشكّلة على البارد.

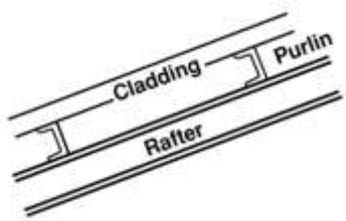
13 -2 متطلبات تصميمية Design requirments

كما رأينا في الفصل الخامس يعتمد تصميم العناصر المنعطفة على:

- درجة التقييد الجانبي المفروضة على الجناح المضغوط.
- مقاومة المقطع للفتل.
- درجتي التقييد الجانبي والفتل المفروضتين على العنصر عند مسانده.

يُعتبَر الجناح المضغوط في الجوائز الثانوية وسكك الجدران ممنوعاً من الانتقال الجانبي بسبب طبقات التغطية المتصلة بالجناح بشكل مستمر بواسطة عناصر ربط كافية (براغي)، انظر الشكل (13-1)، ويكون ذلك صحيحاً عندما يتحمل الجائز الثانوي وسكك الجدران الأحمال الميتة والحية وضغط الرياح ، أما عندما تؤثر الرياح بضغط سالب (مص) على المنشأ قد ينعكس ذلك فيصبح الجناح غير المقيد

بطبقات التغطية مضغوطاً، وفي كل الأحوال تتمتع الجوائز الثانوية وسكك الجدران بقيود جانبية وقيود فتل عند مساندها.

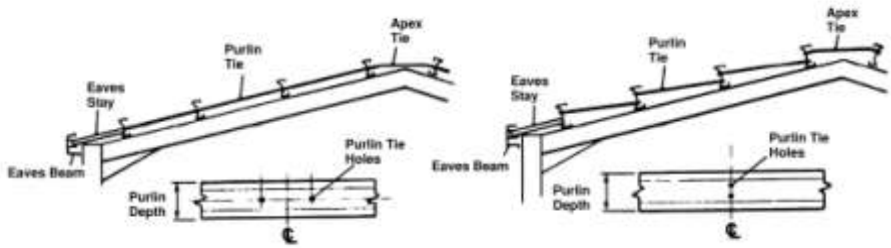


الشكل (13-1)

تتعرض سكك الجدران إلى أحمال شاقولية بسبب أوزان طبقات التغطية وإلى أحمال أفقية بسبب الرياح ولكن بشكل عام لا تُصمَّم سكك الجدران على الأحمال االشاقولية وذلك لأن طبقات التغطية تعمل كجائز عميق تحت تأثير هذه الأحمال. وبناءً على ذلك تُصمَّم سكك الجدران فقط على الأحمال الأفقية الناتجة عن الرياح. يُستعمَل أحياناً قضبان ربط (sagrods) بين الجوائز الثانوية وسكك الجدران وذلك لتخفيض طولها الفعال بحيث يتحول الجائز الثانوي أو سكة الجدار إلى عنصر مستمر، انظر الشكل (13-2) ، ولكن يجب أخذ ردود أفعال قضبان الربط عند نقاط تثبيتها على جائز ذرروة المنشأ وعلى الجائز الذي يصل بين السقف ورؤوس الأعمدة.

من المفيد أن تكون الجوائز الثانوية وسكك الجدران مستمرة على أكثر من مجاز وذلك بغية تخفيض قيمة العزم الواجب مقاومته، ونتيجة لذلك يتحسن أداؤها على مقاومة تحنيب الفتل الجانبي وبالتالي يمكن تخفيض قياس المقاطع العرضية لهذه العناصر، ويمكن تحقيق الاستمرار إما بتصنيع عناصر طولها يغطي مجازين أو أكثر ولكن متطلبات النقل والتركيب تجعل من الصعب استعمال عناصر بطول أكثر من مجازين (حوالي 12 m)، ويمكن تحقيق الاستمرارية بتنفيذ وصلات لهذه

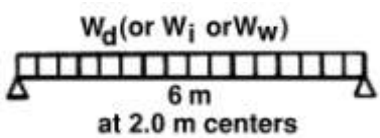
العناصر قادرة على نقل عزم الانعطاف ولكن قد يكون ذلك مكلفاً وغير مبرر اقتصادياً.



الشكل (13-2) قضبان الربط بين العناصر الثانوية

مثال : (13-1)

صمِّم الجائز الثانوي المبين في الشكل أدناه من فولاذ ماركته 43 علماً أن مجازه 6.0 m واستناده بسيط وزاوية ميل السقف 20° وأن الأحمال المطبّقة على المنشأ هي كما يلي:



الحمل الميت $0.15\, kN/m^2$

الحمل الحي $0.75\, kN/m^2$

حمل الرياح (مص) $-0.40\, kN/m^2$

الحـــــل :

* نختار مقطع مجراية 152 x 76 x 17 خواصه كما يلي:

$D = 152.4\, mm$, $\text{B} = 76.2\, mm$, $t = 6.4\, mm$, $\text{T} = 9.0\, mm$

$b/\text{T} = 8.47$, $d/t = 16.6$, $A = 22.8\, cm^2$

$I_x = 852\, cm^4$, $\text{I}_y = 114\, cm^4$, $r_x = 6.11\, cm$, $r_y = 2.23\, cm$

$Z_x = 112\, cm^3$, $Z_y = 21.0\, cm^3$, $S_x = 130\, cm^3$, $S_y = 41.2\, cm^3$

* خصائص المقطع

- باعتبار أن سماكة الجناح $T < 16\,mm$ وأن ماركة الفولاذ المستخدم 43 فإن $p_y = 275\ N/mm^2$ و $\varepsilon = (275/p_y)^{1/2} = 1$

- المقطع لدن لأن

الجدول (2-2)

$b/T = 8.47 < 8.5\,\varepsilon$

$d/t = 16.5 < 79\,\varepsilon$

* الأحمال

- الحمل الميت الكلي:

من طبقات التغطية $2.0 \text{ x } 6.0 \text{ x } 0.15 = 1.8\ kN$

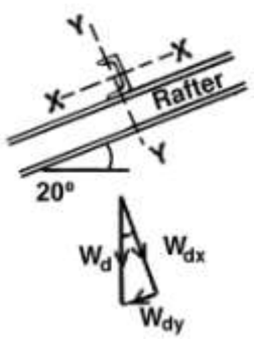
من الوزن الذاتي $6.0 \text{ x } 0.18 = 1.08\ kN$

$W_d = 2.88\ kN$

- الحمل الحي الكلي $W_i = 2.0\cos 20^\circ \text{ x } 6.0 \text{ x } 0.75 = 8.46\ kN$

- حمل الرياح الكلي $W_w = 2.0 \text{ x } 6.0 \text{ x } (-0.4) = -4.80\ kN$

- بما أن الحملين الميت والحي شاقوليان وأن محور الجائز الثانوي الرئيسي يميل 20° علـــى الأفق، لابد من تحليل كل من هذين الحملين إلى مركبتين إحداهمـــا (W_{dx}, W_{ix}) موازية للمحـــور x-x وتنتج عزوماً حول المحور y-y والثانيـــة (W_{dy}, W_{iy}) موازية للمحور y-y وتنتـــج عزوماً حول المحـــور x-x



$W_{dx} = 2.88\cos 20^\circ = 2.71\ kN\ ,\ W_{dy} = 2.88\sin 20^\circ = 0.99\ kN$

$W_{ix} = 8.46\cos 20^\circ = 7.95\ kN\ ,\ W_{iy} = 8.46\sin 20^\circ = 2.89\ kN$

أما حمل الرياح فهو موازٍ بالأصل للمحور y-y لأنه عمودي على

سطح التغطية

$W_{wx} = -4.80 \ kN$

* تراكب الأحمال: سيكون هناك حالتي تحميل حرجتين

– حالة التحميل الأولى

الجدول 1-2

$W_x = 1.4 W_{dx} + 1.6 W_{ix} = 1.4 \text{ x } 2.71 + 1.6 \text{ x } 7.95 = 16.5 \ kN$

$W_y = 1.4 W_{dy} + 1.6 W_{iy} = 1.4 \text{ x } 0.99 + 1.6 \text{ x } 2.89 = 6.0 \ kN$

– حالة التحميل الثانية

الجدول 1-2

$W_x = 1.0 W_{dx} + 1.4 W_{wx} = 1.0 \text{ x } 2.71 + 1.4 \text{ x } (-4.8) = -4.01 \ kN$

$W_y = 1.0 W_{dy} = 1.0 \text{ x } 0.99 = 0.99 \ kN$

* تحقيق حالة التحميل الأولى

– عزم الانعطاف والقص الأعظميين حول المحور x-x

$M_x = 16.5 \text{ x } 6.0 / 8 = 12.4 \ kNm$

$F_x = 16.5 / 2 = 8.3 \ kN$

– عزم الانعطاف والقص الأعظميين حول المحور y-y

$M_y = 6.0 \text{ x } 6.0 / 8 = 4.5 \ kNm$

$F_y = 6.0 / 2 = 3 \ kNm$

– تحقيق القص

$A_{vx} = Dt = 152.4 \text{ x } 6.4 = 975 \ mm^2$

الفقرة 5-2

$P_{vx} = 0.6 \ p_y \ A_{vx} = 0.6 \text{ x } 275 \text{ x } 975 \text{ x } 10^{-3} = 161 \ kN > F_x$

العلاقة 5-1

$A_{vy} = 0.9 \ A_o = 0.9 \text{ x } 2 \ BT = 0.9 \text{ x } 2 \text{ x } 76.2 \text{ x } 9.0 = 1234 \ mm^2$

$P_{vy} = 0.6 \ p_y \ A_{vy} = 0.6 \text{ x } 275 \text{ x} 1234 \text{ x } 10^{-3} = 204 \ kN > F_y$

* تحقيق العزم

– بما أن المقطع لدن وأن القص المطبّق أقل من 60% من طاقة التحمل على القص فإن طاقة تحمّل العزم تحسب كما يلي:

العلاقة 5-2

$$M_{cx} = p_y\, S_x \le 1.2\, p_y\, Z_x$$

إما $M_{cx} = 275 \text{ x } 130 \text{ x } 10^{-3} = 35.8 \; kNm$

أو $M_{cx} = 1.2 \text{ x } 275 \text{ x } 112 \text{ x } 10^{-3} = 37.0 \; kNm$

إذاً $M_{cx} = 35.8 \; kNm$

$$M_{cy} = p_y\, S_y \le 1.2\, p_y\, Z_y$$

الفقرة 5-3

باعتبار أن $S_y > 1.2\, Z_y$ يمكن استبدال المعامل 1.2 في العلاقة السابقة بالنسبة بين الأحمال المصعّدة والأحمال غير المصعّدة أي بالنسبة $W_y / \left(W_{dy} + W_{iy}\right) = 6.0 / \left(0.99 + 2.89\right) = 1.55$

إذاً تُحسب طاقة تحمّل العزم حول المحور y-y وفق إحدى العلاقتين التاليتين

إما $M_{cy} = 275 \text{ x } 41.2 \text{ x } 10^{-3} = 11.4 \; kNm$

أو $M_{cy} = 1.55 \text{ x } 275 \text{ x } 21.0 \text{ x } 10^{-3} = 9.0 \; kNm$

إذاً $M_{cy} = 9.0 \; kNm$

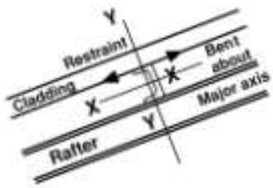
كي يكون المقطع محققاً موضعياً يجب أن يحقق علاقة الترابط التالية:

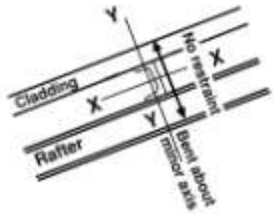
العلاقة 8-1

$$\frac{M_x}{M_{cx}} + \frac{M_y}{M_{cy}} = \frac{12.4}{35.8} + \frac{4.5}{9.0} = 0.85 \; < \; 1 \qquad o.k.$$

- تحقيق تحنيب الفتل

باعتبار أن الجناح المضغوط ممسوك بطبقات التغطية، لاداعي لتحقيق تحنيب الفتل الجانبي الناتج عن الانعطاف حول المحور x-x ولايتم دراسة عدم الاستقرار حول المحور الضعيف y-y وفقاً للفقرة (5-4) نظراً لأن الجائز يتعرض إلى أحمال تنتج عزماً حول هذا المحور.





* تحقيق حالة التحميل الثانية

- عزمي الانعطاف حول المحورين

$M_x = -4.01 \text{ x } 6.0 / 8 = -3.01 \ kNm$

$M_y = 0.99 \text{ x } 6.0 / 8 = 0.75 \ kNm$

إن قيمتي M_x و M_y الناتجتين عن هذه الحالة أصغر بكثير من مثيلتيهما في الحالة السابقة لذا لاحاجة لتحقيق الجائز على العزم موضعياً ولكن الإشارة السالبة لـــ M_x تدل على أن الجناح العلوي للمجراية سيكون مشدوداً وأن الجناحح السفلي غير المقيد جانبياً سيكون مضغوطاً ولذلك لابد من تحقيق الجائز على تحنيب الفتل الجانبي.

- الطول الفعال ونسبة النحافة حول المحور الضعيف

$L_E = 1.0 \text{ x } 6.0 = 6.0 \ m$

$\lambda = L_E / r_y = 6.0 \text{ x } 10^3 / 22.3 = 268 < \lambda_{max} = 350$

العلاقة 5-7 - نسبة النحافة المكافئة $\lambda_{LT} = n u v \lambda$

المقطع مجراية $u = 0.9$

$x = D/T = 152.4/9.0 = 17$

الجدول 5-4

$$\left.\begin{array}{l} \lambda / x = 15.8 \\ N = 0.5 \end{array}\right\} \Rightarrow v = 0.52$$

الجدول 5-7

$\beta = 0.0 \ , \ \gamma = 0.0 \ \Rightarrow \ n = 0.94$

$\lambda_{LT} = 0.94 \text{ x } 0.9 \text{ x } 0.52 \text{ x } 268 = 118$

- مقاومة الانعطاف

الجدول 5-10

$$\left.\begin{array}{l} p_y = 275 \\ \lambda_{LT} = 118 \end{array}\right\} \Rightarrow p_b = 98 \ \ N/mm^2$$

- العزم المقاوم للتحنيب

$$M_b = p_b \ S_x = 98 \text{ x } 130 \text{ x } 10^{-3} = 12.74 \ \ kNm$$

الجدول 5-5

- معامل العزم المنتظم $m = 1$ لأن العنصر محمّل بين نقطتي السند الجانبي

لتجنب حدوث تحقيق تحنيب كلي يجب أن يحقق الجائز علاقة الترابط التالية:

العلاقة 8-2

$$\frac{mM_x}{M_b} + \frac{mM_y}{p_y Z_y} \le 1$$

$$\frac{1 \text{ x } 3.01}{12.74} + \frac{1\text{x } 0.75}{275 \text{ x } 21.0 \text{ x } 10^{-3}} = 0.37 < 1 \quad o.k.$$

* تحقيق تحمّل وتحنيب جسد المقطع:

ليس من الضروري عادةً تحقيق جسد مقطع الجائز الثانوية المستخدم في أسقف الأبنية الصناعية على تحمّل وتحنيب الجسد لصغر الأحمال التي يحملها وهذا واضح من مقدار القص عند مسند الجائز (F_x)

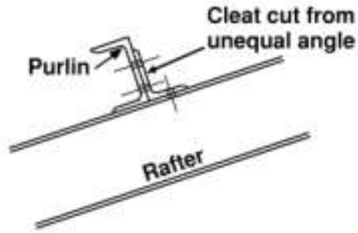
* تحقيق السهم:

إن السهم الأعظمي المسموح به والناتج عن الأحمال الحية غير المصعّدة غير محدد في الجدول (1-3) ولكن جرت العادة أن يؤخذ كما يلي:

$$\delta_{\lim} = L/200 = 6000/200 = 30 \ mm$$

$$\delta_x = \frac{5 W_{ix} \ L^3}{384 \ E \ I_x} = \frac{5 \text{ x } 7.95 \text{ x } 6000^3}{384 \text{ x } 205 \text{ x } 852 \text{ x } 10^4} = 12.8 \ mm < \delta_{\lim} \quad o.k.$$

يتم وصل الجائز الثانوي إلى الجائز الحامل له ببراغي عن طريق زاوية سند كما هو مبين في الشكل أدناه وتصميم هذه الصلة إنشائي نظراً لصغر ردوود أفعال الجائز الثانوي.



مثال : (13-2)

صمِّم المثال (13-1) وذلك باستخدام جوائز ثانوية مستمرة على مجازين

الحــــل :

* نختار نفس مقطع المجراية المستخدم في المثال السابق

$152 \times 76 \times 17$ وقد بينا أنه لدن وأن

$\varepsilon = 1 \;\;,\;\; p_y = 275 \;\; N/mm^2$

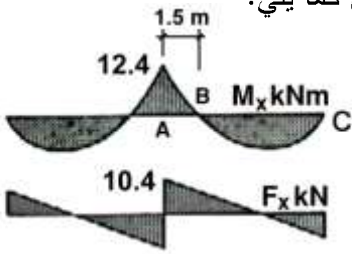
* الأحمال كما في المثال السابق سيكون هناك حالتي تحميل مبينتين في الجدول أدناه

حالة التحميل	$W_x\,(kN)$	$W_y\,(kN)$
(1) (2)	16.5 - 4.01	6.0 0.99

* تحقيق حالة التحميل الأولى

يبين الشكل جانباً مخططي العزم والقص الناتجين عن هذه الحالة

وتحسب القيمة العظمى للعزم والقص كما يلي:



$$M_x = 16.5 \text{ x } 6.0 / 8 = 12.4 \ \ kNm$$
$$F_x = 0.625 \text{ x } 16.5 = 10.4 \ \ kN$$
$$M_y = 6.0 \text{ x } 6.0 / 8 = 4.5 \ \ kNm$$
$$F_y = 0.625 \text{ x } 6.0 = 3.8 \ \ kN$$

– تحقيق القص : لقد وجدنا في المثال السابق أن:

$$P_{vx} = 161\, kN \ , \ p_{vy} = 204\, kN$$

يتضح أن $\ p_{vx} > F_x \ \ , \ \ P_{yx} > F_y \ $ فالقص محقق

– تحقيق العزم : لقد بينا في المثال السابق أن:

$$M_{cx} = 35.8 \ \ kNm \ \ , \ \ M_{cy} = 9.0 \ \ kNm$$

ولكي يكون العنصر محققاً موضعياً يجب أن يحقق علاقة الترابط التالية

العلاقة 8-1

$$\frac{M_x}{M_{cx}} + \frac{M_y}{M_{cy}} = \frac{12.4}{35.8} + \frac{4.5}{9.0} = 0.85 < 1 \quad o.k.$$

– تحقيق التحنيب

بما أن شروط استناد الجائز الثانوي عند المسند الأوسط تؤمن تقيده جانبياً وضد الفتل لأن الجناحين مقيدان في موضعهما، وبما أنه من غير الممكن تقييد الجناح السفلي جانبياً عند نقطة انعدام العزم B لذلك ستتم دراسة أحد مجازي الجائز وليكن AC .

$$L_E = 1.0 \ \ L_{AC} = 600 \ \ cm$$
$$\lambda = 600 / 2.24 = 268$$
$$M_0 = 16.5 \text{ x } 6.0/8 = 12.4\, kNm$$

الجدول 5-7

$$\left.\begin{matrix} \gamma = M_A / M_0 = -1.0 \\ \beta = M_c / M_A = 0.0 \end{matrix}\right\} \Rightarrow \ \text{n} = 0.66$$

$m = 1.0$ — الجدول 5-3

$u = 0.9\ ,\ x = D/T = 152.4/9 = 17$

$\left.\begin{matrix} \lambda / x = 15.8 \\ N = 0.5 \end{matrix}\right\} \Rightarrow v = 0.52$ — الجدول 5-4

$\lambda_{LT} = n\,u\,v\lambda = 0.66 \text{ x } 0.9 \text{ x } 0.52 \text{ x } 268 = 82.8$ — العلاقة 5-7

$p_b = 158\ N/mm^2$ — الجدول 5-10

$M_b = p_b\, S_x = 158 \text{ x } 130 \text{ x } 10^{-3} = 20.54\ kNm$ — العلاقة 5-6

ولتحقيق التحنيب الكلي لابد من تحقيق علاقة الترابط التالية

$$\frac{m\,M_x}{M_b} + \frac{m\,M_y}{p_y\, Z_y} = \frac{1.0 \text{ x } 12.4}{20.54} + \frac{1 \text{ x } 4.5}{275 \text{ x } 21 \text{ x } 10^{-3}} = 0.997 < 1 \quad ok.$$

المقطع غير محقق

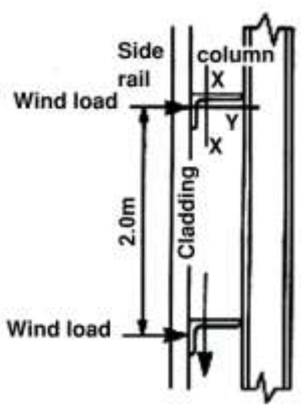
مثال : (13-3)

صمِّم سكك الجدران المبينة في الشكل أدناه من فولاذ ماركته 43 علماً أن مجاز السكة 5.0 m والمسافة بين السكك 2.0 m وأن الأحمال المطبّقة على المنشأ هي كما يلي:

الحمل الميت الناتج عن التغط $0.18\ kN/m^2$

حمل الرياح (ضغط) $0.8\ kN/m^2$

الحـــــل :



* نختار زاوية $125 \text{ x } 75 \text{ x } 10$ لتعمل كسكة جدار خواصها

$I_x = 303\ cm^4\ ,\ I_y = 82.5\ cm^2$

$Z_x = 36.7\ cm^3\ , Z_y = 14.4\ cm^3$

$r_y = 2.08\ cm$

* خصائص المقطع

- باعتبار أن سماكة الجناح $T < 16\,mm$ وأن ماركة الفولاذ المستخدم 43 فإن $p_y = 275\ N/mm^2$, $\varepsilon = (275/p_y)^{1/2} = 1$

- المقطع نصف مدمج لأن

الجدول 2-2

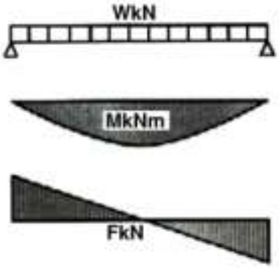
$$b/T = 75/10 = 7.5 < 15\varepsilon$$
$$d/t = 125/10 = 12.5 < 15\varepsilon$$
$$(b+d)/T = (75+125)/10 = 20 < 23\varepsilon$$

* الأحمال:

كما جاء في الفقرة (2-13) تصمم سكك الجدران على الأحمال الأفقية فقط، وبناءً على ذلك ينتج أن القوى التي يجب التصميم عليها هي قوى الرياح وتحسب كما يلي:

$$W_w = 2.0 \times 5.0 \times 0.8 = 8.0\ kN$$
$$W_x = 1.4\,W_w = 1.4 \times 8.0 = 11.2\ kN$$

- عزم الانعطاف



$$M_x = 11.2 \times 5.0/8 = 7.0\ kNm$$

- قوة القص

$$F_x = 11.2/2 = 5.6\ kN$$

* تحقيق طاقة تحمّل القص

الفقرة 5-2

مساحة القص $A_{vx} = 0.9\,dt = 0.9 \times 125 \times 10 = 1125\ mm^2$

العلاقة 5-1

$$P_{vx} = 0.6\,A_v\,p_y = 0.6 \times 1125 \times 275 \times 10^{-3} = 186\ kN > F_x$$

* تحدد طاقة تحمّل العزم للمقطع بتطبيق العلاقة (5-5) لأن المقطع

نصف مدمج

$$M_{cx} = p_y Z_x = 275 \text{ x } 36.7 \text{ x } 10^{-3} = 10.0\, kN > \mathrm{M}_x \qquad o.k.$$

* تصميم سكك الجدران لا يتطلب عادةً تحقيق تحمّل وتحنيب الجسد

* تحقيق السهم : كما في حالة جوائز السقف الثانوية فيحد السهم الأعظمي الناجم عن أحمال الاستثمار والمسموح به بـــ

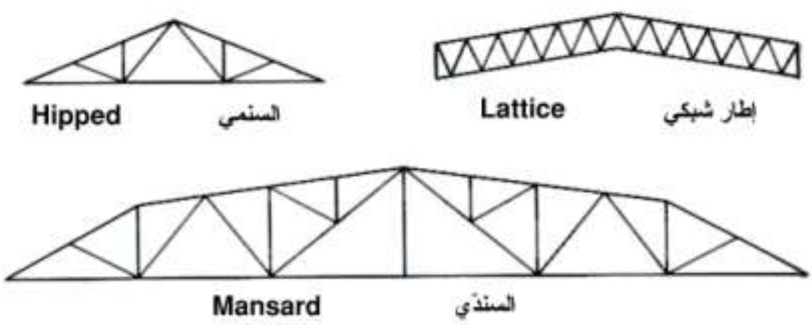
$$\delta_{\lim} = L/200 = 5000/200 = 25\, mm$$

$$\delta_x = \frac{5 W_w L^3}{384\, E\, I_x} = \frac{5 \text{ x } 8 \text{ x } 5000^3}{384 \text{ x } 205 \text{ x } 303 \text{ x } 10^4} = 21\, mm < \delta_{\lim} \qquad o.k.$$

الفصل الرابع عشر
تصميم الجوائز الشبكية
Design of Trusses

14 - 1 أنواع الجوائز الشبكية واستخداماتها

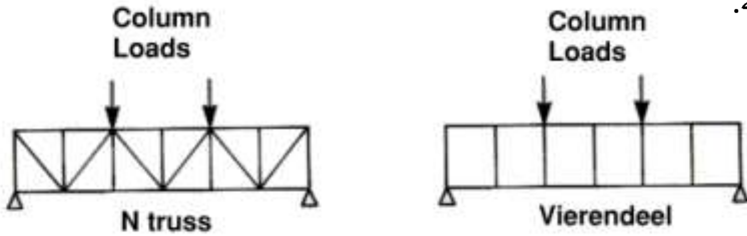
تُصنَّع الجوائز الشبكية من عناصر فولاذية مختلفة وتوصَل مع بعضها بواسطة صفائح وصل ولحام أو براغي، وتُصمَّم عادةً كإطارات متمفصلة في عقدها على الرغم من أن بعض العناصر الرئيسية تُصمَّم مستمرة. يبين الشكل (14-1) مجموعة من الجوائز الشبكية شائعة الاستعمال في أسقف المباني الصناعية حيث يتعلق اختيار أحدها بميل السقف والمجاز المزمع تغطيته، فالجائز الشبكي السنمي يستخدم في المجازات القصيرة (حتى 8 m) بينما يستخدم الإطار الشبكي في المجازات المتوسطة، أما الجائز الشبكي السندي يستخدم في المجازات الكبيرة.



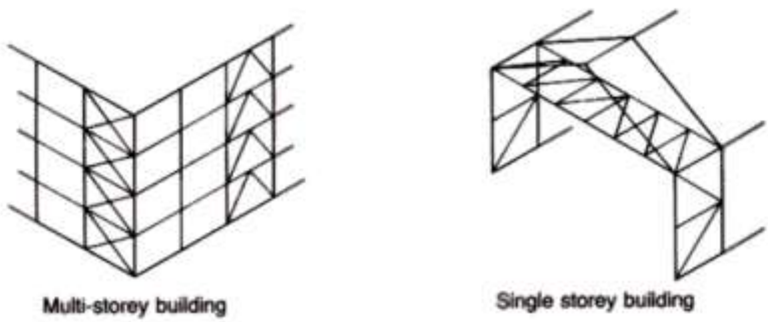
الشكل (14-1) جوائز شبكية للأسقف النهائية

ويبين الشكل (14-2) مجموعة من الجوائز الشبكية الثقيلة التي تستخدم في الأبنية متعددة الطوابق حيث يتوجب تغطية مجازات كبيرة وتحمّل حمولات ثقيلة من الأعمدة في الطابق الأعلى. كما يبين الشكل (14-3) جملتي تربيط شاقولية وأفقية

في مبنيين أحدهما متعدد الطوابق والآخر صناعي حيث تم تشكيل جملتي التربيط على شكل جائز شبكي شاقولي أو أفقي وذلك لتأمين استقرار المبنيين ضد الأحمال الجانبية.



الشكل (14-2) جوائز شبكية للأحمال الثقيلة



الشكل (14-3) جمل التربيط

14-2 الأحمال وتحليل الجوائز الشبكية Loading and analysis

تتعرض الجوائز الشبكية إلى الأحمال التي تم شرحها في الفصل الثاني عشر من ميتة وحية وأحمال رياح ويجب أخذ تراكيات هذه الأحمال بعد تصعيدها بعوامل الأمان المناسبة وفقاً للجدول (2-1) وذلك للتوصل إلى حالة التحميل الأسوأ التي تحكم التصميم. تُنقَل الأحمال إلى الجائز الشبكي من عناصر أخرى كالجوائز الثانوية ويكون الوضع مثالياً إذا تم ذلك عند عقد الجائز الشبكي، ولكن في الحالة العامة لا يكون ذلك ممكناً فمثلاً الجوائز الشبكية المستخدمة في الأسقف النهائية

لايكون توضع الجوائز الثانوية معروفاً بدقة منذ البداية كما أن عمليات الصيانة المستقبلية قد تقتضي تغيير مواقع هذه الجوائز ولهذا يتم اختيار مواقع الأحمال على الجائز الشبكي بشكل عشوائي بحيث تعطي الحالة الإجهادية الأسوأ. ولهذا يشتمل تحليل الجائز الشبكي على المراحل التالية:

1) تحليل الجائز الشبكي بافتراض أن عقده مفاصل (عدا الفيراندیل) وأن الأحمال مطبّقة في العقد ويتم التحليل عدة مرات للأخذ بالحسبان التوضعات المختلفة للأحمال الميتة والحية والرياح.

2) تحليل العناصر الحاملة الرئيسية كالوتر العلوي كجائز مستمر مستند على العقد ومحمّل بردود أفعال الجوائز الثانوية. وعندما لا يكون موضع الجوائز الثانوية محدداً بدقة يُصمَّم الوتر العلوي على عزم قدره $WL/6$ إضافة للأحمال المحورية حيث W رد فعل الجائز الثانوي و L المجاز الأفقي بين عقدتين.

3) تقدير الإجهادات الناتجة عن لامركزية الوصلات حيث يجب تصميم العناصر والوصلات بأخذ اللامركزية الناتجة عن عدم تلاقي محاور العناصر في العقد بالحسبان.

3 - 14 نحافة العناصر Slenderness of members

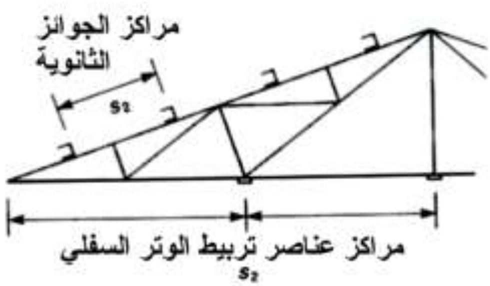
تُحدَّد نحافة كل من عناصر الجائز الشبكي بالنسبة بين طوله الفعّال ونصف قطر عطالته حول المحور الذي يدرس حوله التحنيب وتُحدَّد وفق التالي:

1) تُحدَّد نسبة نحافة عناصر الجسد وفق الجدول (7-1) إذا تشكلت هذه العناصر من زوايا أو مجاري أو مقاطع T.

2) تُحدَّد نسبة نحافة عناصر الوترين السفلي والعلوي وفق الجدول (1-7) إذا تشكلت هذه العناصر من زوايا أو مجاري أو مقاطع T وتقارن مع نسبة النحافة المحسوبة على أساس قسمة البعد بين عناصر السند الجانبي s_2 على نصف قطر العطالة الأصغري $s_2 / r_{\min}$ ويؤخذ الأكبر. انظر الشكل (14-4).

3) تُحدَّد نسبة نحافة عناصر الجائز الشبكي وفق الجدول (4-4) إذا كانت مشكّلة من العناصر خلافاً للبندين السابقين.

وفي كل الأحوال يجب أن لاتزيد نسبة النحافة لأي عنصر عن النسب القصوى المنصوص عليها في الفقرة (1-4)، كما يجب أن لاتقل نسبة نحافة عناصر الوترين السفلي والعلوي في مستوي الجائز الشبكي عن /50/ وأن لاتقل نسبة نحافة عناصر الجسد في مستوي الشكل عن /100/ وذلك لإهمال الإجهادات الثانوية.



الشكل (14-4) جائز شبكي

14 - 4 طاقة تحمّل العناصر على الشد Tension capacity

تُحدَّد طاقة تحمل أي عنصر على الشد وفقاً للفقرة (2-3) بالعلاقة التالية

$$P_t = A_e \; p_y \qquad (14\text{-}1)$$

حيث: p_y المقاومة التصميمية وتحدد من الجدول (1-2)

A_e المساحة الفعالة لمقطع العنصر وتحدد كما في الفقرة (2-3)

يجب أخذ تأثير اللامركز الناتجة عن وصلتي العنصر بالحسبان كما جاء في الفقرة (3-3)

5 - 14 طاقة تحمّل العناصر على الضغط Compression resistance

تحدد طاقة تحمل أي عنصر على الضغط وفقاً للفقرة (2-4) بالعلاقة التالية

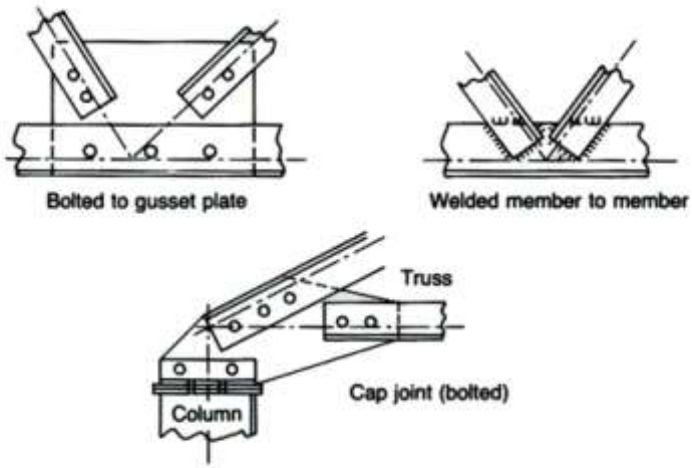
$$P_c = A_g\ p_c \qquad (14\text{-}2)$$

حيث: A_g مساحة المقطع العرضي كاملة

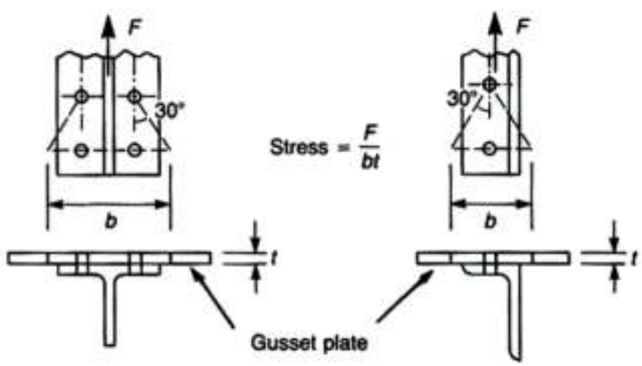
p_c مقاومة الضغط وتتعلق بنسبة النحافة λ والمقاومة التصميمية p_y وتحدد من الجداول (4 - 3a, b, c, d) ويجب تخفيض المقاومة التصميمية وفقاً للجدول (2-3) إذا كان المقطع نحيفاً. وتخفض أيضاً بـــ $20N/mm^2$ عندما يكون المقطع مصنّعاً باللحام.

6 - 14 الوصلات Connections

الوصلات ضرورية لوصل العناصر ببعضها أو لوصل الجائز الشبكي إلى بقية الهيكل الإنشائي، ويستعمل ثلاثة أنواع رئيسية من الوصلات: وصلة براغي مع صفيحة وصل، وصلة لحام مع صفيحة وصل، ووصلة لحام عنصر إلى عنصر، انظر الشكل (5-14). يجب أن تلتقي محاور العناصر الموصولة (أو محاور صفوف براغي الوصل) في نقطة واحدة، وإذا لم يكن بالإمكانية تحقيق ذلك لابد من أخذ اللامركزية الناتجة بالحسبان عند تصميم العناصر والوصلات. ويجب تحقيق الإجهادات المباشرة المطبّقة على صفيحة الوصل وذلك بأخذ مساحة صفيحة الوصل مساوية $(b \times t)$ كما هو مبين في الشكل (6-14)



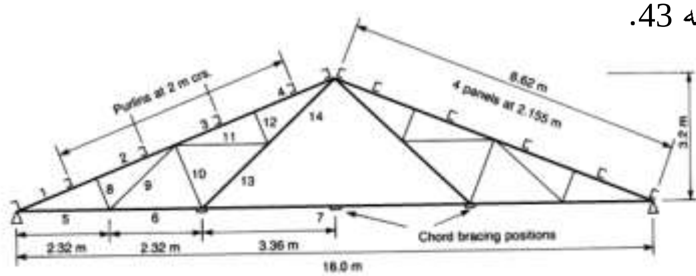
الشكل (14-5) وصلات نموذجية



الشكل (14-6) الإجهادات في صفيحة الوصل

مثال : (14-1)

يتألف الإطار الرئيسي في مبنى صناعي من جائز شبكي سنمي وعمودين مجازه 16 m كما في الشكل أدناه والتباعد بين الإطارات الرئيسية 4 m، كما أن زاوية ميل السقف 21.8° . صمم الجائز الشبكي من فولاذ ماركته 43.

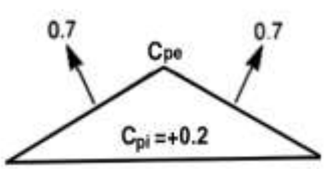


الحـــــل :

* تقدير الأحمال

- أوزان طبقات التغطية $0.12\,kN/m^2$
- الوزن الذاتي للجائز الشبكي $8\,kN$
- الوزن الذاتي للجوائز الثانوية $0.11\,kN/m$
- الأحمال الحية (الثلج + خدمات) $0.75\,kN/m^2$
- الضغط الديناميكي للرياح $0.68\,kN/m^2$

نتيجة دراسة أحمال الرياح تبين أن أسوأ حالة تحميل لمنشأة السقف تنشـــأ عندما تهب الرياح موازيـــة لمحور البناء وعندها يقدر معاملي الضغط الداخلي والخارجي كمـــا هو مبين في الشكل جانباً وعليه يحسب حمل الرياح كما يلي:



$$-(0.7+0.2)\,\text{x}\,0.68=-0.61\,kN/m^2$$

- أحمال الجائز الثانوي

الحمل الميت:

من طبقات التغطية $4 \times 2 \times 0.12 = 0.96\,kN$

من الوزن الذاتي للجائز الثانوي $4 \times 0.11 = 0.44\,kN$

من الوزن الذاتي للجائز الشبكي $8/10 = 0.8\,k.N$

$$\overline{2.2\,k.N}$$

الحمل الحي: $4 \times 2 \times 0.75 \cos 21.8^{\circ} = 5.56\,kN$

حمل الرياح: $4 \times 2 \times (-0.61) = -4.88\,kN$

- أحمال الوتر العلوي:

نوع الحمل	مقدار الحمل (kN)
الحمل الميت	$8.6 \times 2.2/2 = 9.48$
الحمل الحي	$8.6 \times 5.56/2 = 24.0$
حمل الرياح	$-8.6 \times 4.88/2 = -21.0$

- أحمال العقد

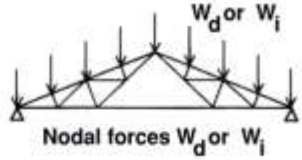
تحدد أحمال العقد بقسمة أحمال الوتر العلوي على العقد فينتج حمل العقدة الواحدة كما يلي:

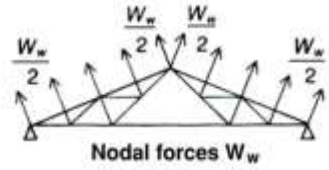
الحمل الميت $W_d = 9.48/4 = 2.37\,kN$

الحمل الحي $W_i = 24.0/4 = 6.0\;\; kN$

حمل الرياح $W_w = -21.0/4 = -5.25\;\; kN$

ويبين الشكلين التاليين هذه الأحمال واتجاهاتها





* تحدد القوى في عناصر الجائز الشبكي الناتجة عن كل نوع من الأحمال وذلك بتحليله تحت تأثير أحمال العقد فتنتج القوى المبينة في الجدول التالي:

العنصر	القوى في العناصر (kN)				
	الحمل الميت F_d	الحمل الحي F_i	حمل رياح F_w	$1.4F_d$ $+1.6F_i$	$1.0F_d$ $+1.4F_w$
1	22.4	56.6	- 46.7	121.9	- 43.0
2	21.4	54.3	- 46.7	116.8	- 44.0
3	20.6	52.1	- 46.7	112.2	- 44.8
4	19.7	49.9	- 46.7	107.4	- 45.7
5	- 20.7	- 52.5	42.8	- 113.0	39.2
6	- 17.8	- 45.0	35.4	- 96.9	31.8
7	- 11.9	- 30.0	20.7	- 64.7	17.1
8	2.2	5.6	- 5.3	12.0	- 5.2
9	- 3.0	- 7.5	6.8	- 16.2	6.5
10	4.4	11.1	- 10.5	23.9	- 10.3
11	- 2.9	- 7.4	6.8	- 15.9	6.6
12	2.2	5.6	- 5.3	12.0	- 5.2
13	- 5.9	- 15.0	16.0	- 32.3	16.5
14	- 8.9	- 22.5	22.8	- 48.5	23.0

تم اعتبار القوة الضاغطة موجبة والقوة الشاردة سالبة وتم إهمال حالتي التحميل $1.4\,F_d + 1.4\,F_W$ ، $1.2\left(F_d + F_i + F_w\right)$ لأنهما لا تؤديان إلى حالة التحميل الأسوأ.

* يحدد العزم الذي يخضع له الوتر العلوي وفقاً للفقرة (2-14) كما يلي:

$M = WL/6$

رد فعل الجائزين الثانويين $W = 1.4\,(0.96 + 0.44) + 1.6 \text{ x } 5.56 = 10.9\,kN$

المسافة الأفقية بين عقدتين $L = 2.15 \text{ x } \cos 21.8^{\circ} = 1.99\, m$

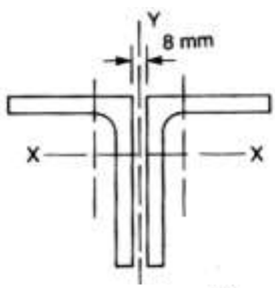
$M = 10.9 \text{ x } 1.99 / 6 = 3.6\, kNm$

* تصميم الوتر العلوي

- تحدد قوتا الضغط F_c والشد F_t الأعظميتان اللتان يخضع لهما الوتر العلوي من الجدول أعلاه $F_c = 121.9\, kN \;,\; F_t = 45.7\, kN$

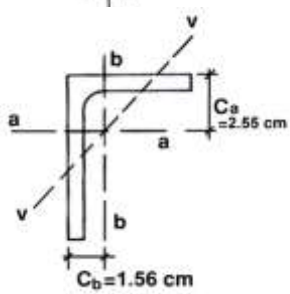
- الطول المحصور بين عقدتين $L_1 = 8.62 / 4 = 2.155\, m$

- نختار مقطعاً من زاويتين $2L\, 80 \text{ x } 60 \text{ x } 8$ موصولتين ظهراً لظهر كما هو مبين في الشكل جانباً وبحيث يتم ربــط الزاويتين ببعضهما عند منتصف وربــع الطــول فتكون المسافة بين الروابط مساوية لــ



$L_1/4 = 2.155/4 \approx 0.54\, m$

- خصائص الزاوية الواحدة



$A_1 = 10.6\, cm^2 \;,\; I_a = 65.8\, cm^4$

$I_b = 31.5\, cm^4 \;,\; I_v = 17.1\, cm^4$

$Z_a = 12.1\, cm^3 \;,\; Z_b = 7.09\, cm^3$

$r_a = 2.49\, cm \;,\; r_b = 1.72\, cm$

$r_v = 1.27\, cm$

- خصائص المقطع المجمع

$$A = 2A_1 = 21.2\, cm^3 \,,\, I_x = 2I_a = 131.6\, cm^4 ,\, Z_x = 24.2\, cm^3$$

$$I_y = 2\left[I_b + A_1 (c_b + 0.4) \right]$$

$$= 2\left[31.5 + 10.6\, (1.56 + 0.4)^2 \right] = 144.44\, cm^4$$

$$r_x = 2.49\, cm \,,\; r_y = (I_y / A)^{1/2} = 2.61\, cm$$

الجدول (2-1)

– بما أن ماركة الفولاذ المستخدم 43 وأن سماكة الزاوية $t = 8\,mm < 16$ فإن $p_y = 275 \;,\; \varepsilon = \left(275 / p_y\right)^{1/2} = 1$

– المقطع نصف مدمج لأن

الجدول (2-2)

$$b / t = 80 / 8 = 10 \;<\; 15\,\varepsilon = 15$$

$$\left(b + d\right) / t = \left(80 + 60\right) / 8 = 17.5 \;<\; 23\,\varepsilon$$

إذاً لا حاجة لتخفيض p_y

– لتحقيق طاقة تحمل الوتر العلوي موضعياً يجب أن تتحقق علاقة الترابط التالية:

العلاقة (8-1)

$$\frac{F}{A_g\;p_y} + \frac{M_x}{M_{cx}} \;\leq 1$$

$$F = F_c = 121.9\,kN \;,\; M_x = 3.6\,kNm$$

$$M_{cx} = p_y Z_x = 275 \text{ x } 24.2 \text{ x } 10^{-3} = 6.655\,kNm$$

نعوض في العلاقة السابقة فينتج

$$\frac{121.9}{21.2 \text{ x } 275 \text{ x } 10^{-1}} + \frac{3.6}{6.655} = 0.71 \;<\; 1 \qquad o.k.$$

– لتحقيق التحنيب الكلي للوتر العلوي لابد من تحقيق علاقة الترابط التالية:

العلاقة (8-2)

$$\frac{F}{A_g\;p_c} + \frac{mM_x}{M_b} \;\leq 1$$

تحدد نسبة النحافة باعتبار أن وصل عناصر الوتر العلوي مع صفائح الوصل غير معروف مسبقاً لذا سنفترض الأسوأ بحيث يتم الوصل ببرغي واحد بين كل زاوية وصفيحة الوصل، وعليه تحسب نسب النحافة كما يلي:

الجدول (7-1)

إما $\lambda_x = L_1 / r_x = 215.5 / 2.49 = 86$

أو $\lambda_x = 0.7 L_1 / r_x + 30 = 90$

إذاً $\lambda_x = 90 \;>\; \lambda_{\min} = 50$

وعلى فرض أن أي من الزاويتين المشكّلتين للمقطع يمكن أن تحنب بمفردها بين نقطتي ربط حول محورها الضعيف فنجد نسبة نحافة الزاوية الواحدة $\lambda_c = (L\ /4)/r_v = 54/1.27 = 42$

فتحسب نسبة نحافة العنصر المجمع من زاويتين حول المحور y كما يلي:

الجدول (7-1)

$$\lambda_y = \left[(L_1 / r_y)^2 + \lambda_c^2 \right]^{1/2} = \left[(215.5/2.6)^2 + 42^2 \right]^{1/2} = 92$$

$$\lambda_y = 92 > 1.4\,\lambda_c = 59$$

بالعودة إلى الجدول (2-4) يتبين أن مقاومة الضغط تحدد من الجدول (4-3c) بدلالة p_y و λ_y فنجد: $p_c = 139\ \ N/mm^2$

يحدد العزم المقاوم لتحنيب الفتل الجانبي M_b بتطبيق العلاقة (5-10) لأن المقطع مؤلف من زوايا ونسبة النحافة $\lambda < 100$ وبناءً على ذلك نجد:

$$M_b = 0.8\, p_y Z_x = 0.8 \text{ x } 275 \text{ x } 24.2 \text{ x } 10^{-3} = 5.33\ \text{k}N\, m$$

نعوض في علاقة الترابط مع اعتبار $(m = 1)$ فنجد:

$$\frac{121.9}{139 \text{ x } 21.2 \text{ x } 10^{-1}} + \frac{1 \text{ x } 3.36}{5.35} \approx 1$$

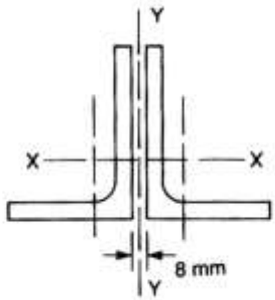
* تصميم الوتر السفلي

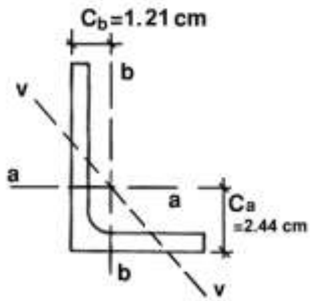
- تحدد قوتا الضغط F_c والشد F_t الأعظميتان اللتان يخضع لهما الوتر السفلي من جدول القوى في العناصر أعلاه فنجد:

$$F_c = 39.2\, kN \quad , \quad F_t = 113.0\, kN$$

نختار مقطعاً من زاويتين $2L\, 75 \text{ x } 50 \text{ x } 6$ موصولتين ظهراً لظهر كما هو مبين في الشكل أدناه وبحيث يتم ربط الزاويتين ببعضهما عند منتصف العنصر وعلى بعد 45 cm

(تسع مرات طول الساق الصغرى للزاوية) من العقدة فتكون المسافة القصوى بين الروابط:





$$s_1 = 0.5L - 45 = 0.5 \text{ x } 232 - 45 = 71\, cm$$

– خصائص الزاوية الواحدة

$$A_1 = 7.22\, cm^2 \;,\; I_a = 40.9\, cm^4$$
$$I_b = 14.6\, cm^4 \;,\; I_v = 8.48\, cm^4$$
$$r_x = 2.38\, cm \;\;,\; r_y = 1.42\, cm$$
$$r_v = 1.08\, cm$$
$$Z_a = 8.1\, cm^3 \;,\; Z_b = 3.87\, cm^3$$

– خصائص المقطع المجمع

$$A = 2A_1 = 14.44\, cm^3 \;,\; I_x = 2I_a = 81.8\, cm^4$$
$$Z_x = 2Z_a = 16.2 \;,\; r_x = r_a = 2.38$$
$$I_y = 2\left[14.6 + 7.22\,(1.21 + 0.4)^2\,\right] = 66.63\, cm^4$$
$$r_y = (66.63 / 14.44)^{1/2} = 2.15\, cm$$

– على فرض أنه تم وصل العناصر إلى العقد بوصلات براغي وأن قطر الثقب المعد للبرغي الواحد هو 22 mm فتحسب المساحة الصافية للعنصر كما يلي: $A_{net} = A - 2 \text{ x } 2.2 \text{ x } 0.6 = 11.8\, cm^2$

وعليه تحسب المسافة المكافئة باعتبار الفولاذ المستخدم Gr 43

الفقرة (3-2) كما يلي: $A_e = 1.2 \text{ x } A_{net} = 14.16\, cm^2 \;<\; A = 14.44\, cm^2$

– تحسب طاقة تحمل الشد وفق العلاقة التالية:

العلاقة (3-1) $P_t = A_e\, p_y = 14.16 \text{ x } 275 \text{ x } 10^{-1} = 389.4\, kN > F_t = 113\, kN \quad o.k.$

– تحدد نسبة النحافة باعتبار أن وصل العنصر مع صفيحة الوصل يتم

ببرغي واحد وعليه تحسب نسبة النحافة كما يلي:

إما $\lambda_x = L / r_x = 232 / 2.38 = 97.5$

أو $\lambda_x = 0.7L / r_x + 30 = 98$

إذاً $\lambda_x = 98 > \lambda_{\min} = 50$

وعلى فرض أن أي من الزاويتين المشكِّلتين للمقطع يمكن أن تحنب بمفردها بين نقطتي ربط حول محورها الضعيف فتحسب نسبة نحافة الزاوية كما يلي: $\lambda_c = s_1 / r_v = 71/1.08 = 65.7$

وبفرض أنه تم استخدام عناصر تربيط للوتر السفلي كما في الشكل التوضيحي للجائز الشبكي أعلاه فنجد أن المسافة القصوى بين قضيبي تربيط هي $s_2 = 4.64\, m$ فتحدد نسبة النحافة حول المحور y كما يلي:

الجدول (7-1) الفقرة (4-1)

$$\lambda_y = \left[\left(s_2 / r_y \right)^2 + \lambda_c^2 \right]^{1/2} = \left[\left(464 / 2.15 \right)^2 + \left(65.7 \right)^2 \right]^{1/2} = 225$$

$$\lambda_y = 225 < \lambda_{\max} = 250$$

- بالعودة إلى الجدول (4-2) نجد أن مقاومة الضغط تحدد من الجدول (4-3c) بدلالة p_y و λ_y فنجد: $p_c = 33 \;\; N / mm^2$

ومنه تحدد طاقة تحمل العنصر على الضغط كما يلي:

العلاقة (4-1)

$$P_c = A_g\, p_c = 14.44 \text{ x} 33 \text{ x} 10^{-1} = 47.6\, kN > \text{F}_c = 39.2\, kN \qquad o.k.$$

* تصميم أحد عناصر الجسد (العنصر رقم 10)

نجد من جدول القوى أعلاه قوتي الضغط والشد الأعظميتين كما يلي:

$$F_c = 23.9 \;\; kN \;,\;\; F_t = -10.3 \;\; kN$$

- نختار مقطعاً من زاوية واحدة $L\, 60 \text{ x } 60 \text{ x } 6$ خصائصها الهندسية كما يلي:

$A = 6.95\ cm^2\ \ ,\ I_a = I_b = 23.2\ cm^4\ \ ,\ I_v = 9.64\ cm^4$

$Z_x = Z_y = 5.39\ cm^3\ \ ,\ r_x = r_y = 1.83\ cm\ \ ,\ r_v = 1.18\ cm$

بما أن $t = 6 < 16\,mm$ فإن $p_y = 275\,,\varepsilon = (275/p_y)^{1/2} = 1$

- المقطع نصف مدمج لأن $b/T = 60/6 = 10 > 15\varepsilon$

$(b+d)/T = (60+60)/6 = 20 < 23\varepsilon$

- تحديد نسبة نحافة العنصر:

لعدم المعرفة المسبقة بتصميم الوصلة نفرض أن العنصر موصول بكل من طرفيه إلى صفيحة وصل ببرغي واحد وعليه تحدد نسبة النحافـــة كما يلي:

الجدول إما $\lambda_v = 1.0\,L_v / r_v = 1.0 \text{ x } 172 / 1.18 = 146$

7-1 أو $\lambda_v = 0.7\,L_v / r_v + 15 = 0.7 \text{ x } 172 / 1.18 = 117$

$\Rightarrow \lambda_v = 146$

إما $\lambda_a = \lambda_b = 1.0\,L_a / r_a = 1.0 \text{ x } 172 / 1.83 = 94$

أو $\lambda_a = \lambda_b = 0.7\,L_a / r_a + 30 = 0.7 \text{ x } 172 / 1.83 + 30 = 96$

$\Rightarrow \lambda_a = 96$

إذاً $\lambda = 146$

- بالعودة إلى الجدول (4-2) نجد أنه لتحديد مقاومة الضغط يجب

العلاقة العودة إلى الجدول (4-3c) فنجد $p_c = 71\,N/mm^2$

4-1

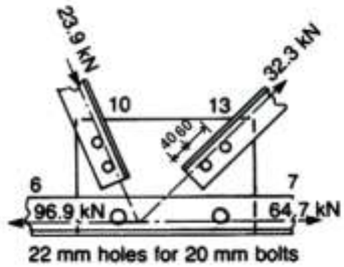
- تحدد طاقة تحمّل العنصر على الضغط بتطبيق العلاقة التالية:

$P_c = A_g\ p_c = 6.95 \text{ x } 71 \text{ x } 10^{-1} = 49.3\,kN > F_c \quad o.k.$

- وبما أن قوة الشد صغيرة بالمقارنة مع قوة الضغط فالمقطع أيضاً محقق على الشد.

* تصميم وصلة نموذجية

- لنصمم الوصلة بين العناصر $13, 10, 7, 6$ باستخدام صفيحة وصل سماكتها $8\,mm$ وبراغي سوداء قطر $20\,mm$ وماركتها 4.6 كما هو مبين في الشكل أدناه.



- القوة العظمى في العنصر 13 هي: $F = 32.3\ kN$
- فرق القوة بين العنصرين 6 و 7 يساوي $32.2\ kN$ فإذا تم وصل العنصرين 6 و 7 في هذه الوصلة فإن القوة العظمى تساوي القوة في العنصر (6) أي $96.9\ kN$.
- طاقة تحمّل برغيين على القص

العلاقة 10-2 $F_s = 2\,P_s = 2\,p_s\ A_s = 2 \text{ x } 160 \text{ x } 245 \text{ x } 10^{-3} = 78.4\ kN$

- طاقة الدهس لبرغيين

العلاقة 10-4 $F_{bb} = 2P_{bb} = 2dt\ p_{bb} = 2 \text{ x } 20 \text{ x } 6\,460 \text{ x } 10^{-3} = 110.4\ kN$

- طاقة الدهس للصفيحة

العلاقة 10-5 $F_{bs} = 2P_{bs} = 2 \text{ x } 2dt\ p_{bs} = 2 \text{ x } 20 \text{ x } 6 \text{ x } 460 \text{ x } 10^{-3} = 110\ kN$

$F_{bs} \le et\ p_{bs} / 2 = 40 \text{ x } 6 \text{ x } 460 \text{ x } 10^{-3} / 2 = 55.2\ kN$

إذاً طاقة تحمّل مجموعة البرغيين تحدد بـــ

$F_{bs} = 55.2\ kN > 32.3\ kN \qquad o.k.$

- تحقيق صفيحة الوصل : تحدد إجهادات الشد في صفيحة الوصل كما جاء في الفقرة (6-14) والشكل (6-14)

$$\left.\begin{array}{l}\sigma_t = \dfrac{F}{bt} \\ b = 60/\cos 30^\circ - 22 = 47mm\end{array}\right\} \Rightarrow \sigma_t = \frac{32.3 x 10^3}{47 \text{ x } 6} = 115 N/mm^2$$

إذاً

$$\sigma_t = 115 \ N/mm < p_y = 275 \ N/mm^2 \qquad o.k.$$

* تصمم بقية عناصر الجائز الشبكي بنفس الطريقة ويجب الانتباه إلى أنه ليس عملياً اختيار مقطع لكل عنصر ويفضل أن لايزيد عدد أنواع المقاطع المختارة على أربعة.

الفصل الخامس عشر

جمل التربيط

Bracing systems

1 - 15 الأحمال التي تقاومها جمل التربيط

تتألف جمل التربيط عادةً من مقاطع فولاذية بسيطة مثل مبسطات أو زوايا أو مقاطع مفرغة وتُرتَّب هذه العناصر لتشكل جوائز شبكية كما في الشكل (14.3). وفي أغلب الأحيان تُرتَّب العناصر بشكل متصالب لكي تصمم لتتحمل قوى شد فقط.

تخضع جمل التربيط إلى قوى أفقية ناتجة عن عدد من المصادر مثل:

- أحمال الرياح وأحمال الروافع التي تؤثر أفقياً على المنشأ.
- أحمال الهزات الأرضية: غالباً أحمال ساكنة أفقية مكافئة.
- قوى ناتجة عن التقييد الجانبي للأعمدة والجوائز.
- قوى افتراضية لتحقيق الاستقرار الجانبي للمنشأ.
- قوى مؤقتة ناتجة عن أعمال التنفيذ.

يجب أن يمتلك المنشأ الصلابة الكافية ضد الانزياح الجانبي لتُؤمِّن مقاومة قوى الرياح الأفقية، وكحد أدنى يجب تصميم المنشأ لمقاومة الأحمال الأفقية الافتراضية المنصوص عليها في الفقرة (2-1-1)

15 – 2 تربيط الأبنية متعددة الطوابق Multi – storey bracing

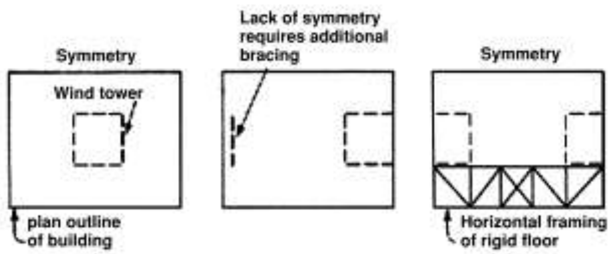
يتم مقاومة القوى الأفقية في الأبنية متعددة الطوابق بـــ :

- تصميم عقد الإطارات كعقد صلبة قادرة على تحمل العزوم المطبّقة وبالتالي تحليل الإطارات وفقاً لذلك.

– تأمين جدران قص خرسانية لتقاوم القوى الأفقية مثل جدران بيت الدرج أو جدران بئر المصعد.

– تأمين إطارات تربيط من العناصر الفولاذية كما في الشكل (14-3).

يتطلب اختيار مواقع شبكات التربيط أو جدران القص الخرسانية عناية خاصة حيث يفضل التوضع المتناظر لتجنب خضوع جملة التربيط إلى عزوم فتل، ويبين الشكل (15-1) ثلاثة بدائل.



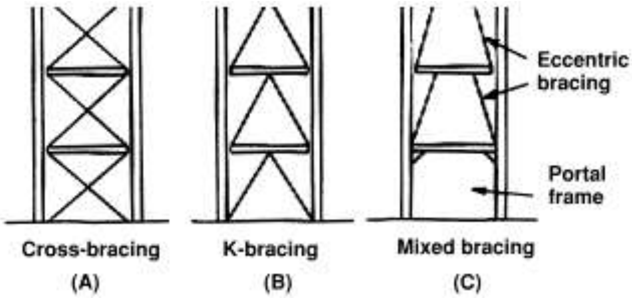
الشكل (15-1) مواقع جمل التربيط

يجب تأمين عمل إطاري أفقي في مستوي الطوابق لينقل الأحمال الأفقية إلى جمل التربيط الشاقولية فمثلاً تنتقل أحمال الرياح الأفقية بواسطة التغطية إلى أرضية الطوابق ومنها إلى جمل التربيط الشاقولية ولهذا يجب أن يؤمن التصميم إطارات أفقية في مستوي أرضية الطوابق لتنقل هذه الأحمال إلى جمل التربيط الشاقولية.

وعندما تتكون أرضيات الطوابق من بلاطات خرسانية لا حاجة لأي إطارات أفقية لأنها تتصرف كألواح صلبة في مستويها وتفي بغرض نقل الأحمال الأفقية إلى جمل التربيط الشاقولية.

تأخذ إطارات التربيط أشكالاً عدة كما هو مبين في الشكل (15-2)، على الرغم من أن التربيط المتصالب يسمح بتصميم عناصر التربيط على تحمل قوى شادة فقط إلا أنه يعيق فتح الأبواب و النوافذ والبديلان المبينان في الشكلين (15-2b,c) يسمحان

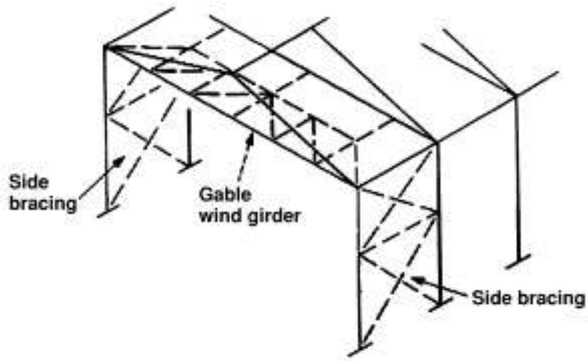
بوجود الفتحات لكن يمكن أن تتعرض عناصرهما إلى ضغط. ولذلك عند تصميم هذه العناصر يجب أن تكون نسبة نحافتها أقل ما يمكن.



الشكل (15-2) إطارات التربيط الشاقولية

15 - 3 تربيط الأبنية وحيدة الطابق Single – storey bracing

تصمم جمل التربيط في الأبنية وحيدة الطابق لتقاوم أحمال الرياح وأحمال الروافع الموازية لمحور البناء (المتعامدة مع مستوي الإطارات الرئيسية). أما أحمال الرياح وأحمال الروافع الموازية لمستوي الإطارات الرئيسية فتقاوَم بالفعل الإطاري أو بالأعمدة فقط إذا كانت تعمل كأظفار ولهذا لا حاجة لجمل تربيط في مستوي الإطارات الرئيسية. إذاً يجب تأمين جمل تربيط كالمبينة في الشكل (3-14) لتقاوم أحمال الروافع الطولية والأحمال الناتجة عن الرياح (ضغط أو مص) على الواجهتين السنميتين (الجانبيتين) وكذلك الناتجة عن احتكاك الرياح مع الواجهتين الرئيسيتين ومع سقف البناء. وبناءً على ذلك يجب تأمين شبكة تربيط أفقية (جائز رياح) عند كل من نهايتي البناء إما في مستوي الوتر العلوي عندما تكون زاوية ميل السقف صغيرة أو في مستوي الركبة كما هو مبين في الشكل (3-15) ويتم سند جائز الرياح بشبكة التربيط الشاقولية التي تتحمل أيضاً القوى الطولية الناتجة عن فرملة الروافع.

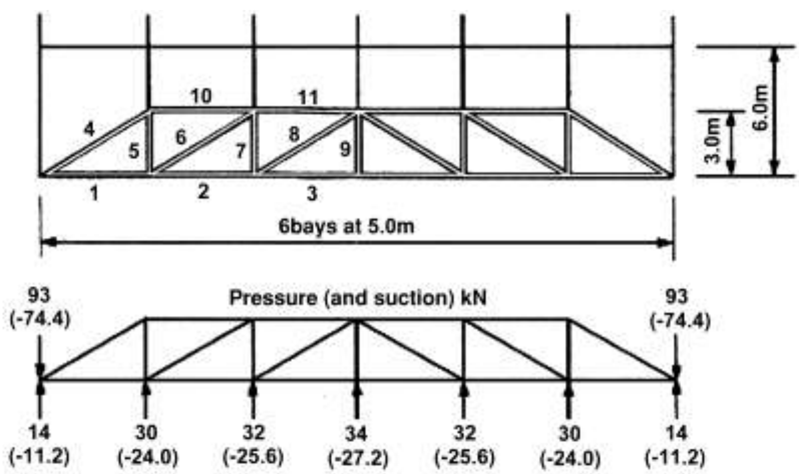


الشكل (15-3) جائز الرياح

يحتاج وتر الجائز الشبكي السفلي كذلك إلى تربيط لتقييده جانبياً ومنعه من التحنيب عندما تنقلب القوى فيه من شد إلى ضغط نتيجة أحمال الرياح على السقف.

مثال : (15-1)

صمم جائز الرياح المبين في الشكل أدناه من فولاذ ماركته 43 علماً أن المسافة بين الإطارات الرئيسية 6.0m وأن ارتفاع الركبة 12.5 m وأن المسافة بين الأعمدة في الواجهة الجانبية (أعمدة الرياح) التي تنقل أحمال الرياح إلى جائز الرياح 5.0m . كما أن ردود أفعال أعمدة الرياح (غير مصعدة) مبينة في الشكل أدناه في حالتي الضغط أو السحب (المص) على الواجهة الجانبية



الحـــــل :

يمكن إيجاد القوى في عناصر الجائز بأي من طرق تحليل الجوائز الشبكية ويبين الجدول أدناه هذه القوى مصعدة بعامل أمان $\gamma_f = 1.4$ في كلا حالتي الضغط والسحب مع اعتبار إشارة القوى الضاغطة موجبة.

Member	Factored member force (kN)	
	Pressure	Suction
1	184	-147
2	299	-239
3	338	-270
4	-215	172
5	111	-89
6	-133	106
7	69	-55
8	-46	37
9	48	-38
10	-184	147
11	-299	239

* تصميم الوتر الخارجي:

– يتضح من الجدول أعلاه أن قوة الضغط العظمى في العنصر (3) تساوي $338\ kN$

– نختار المقطع القياسي $254 \times 146 \times 37$ UB ذي المواصفات التالية:

$D = 256 mm\ ,\ B = 146.4\ mm\ ,\ t = 6.4\ mm\ ,\ T = 10.9\ mm$

$b/T = 6.72\ , D/t = 34.2\ , r_x = 10.8\ cm\ , r_y = 3.47 cm\ , A = 47.4 cm^2$

– يحدد الطول الفعال ونسبة النحافة للعنصر (3) كما يلي:

الجدول (4-4) $L_{Ex} = 0.85\ L = 0.85\ x\ 500 = 425\ cm \ \Rightarrow \lambda_x = L_{Ex}/r_x = 39$

$L_{Ey} = 1.0\ L = 500\ cm \ \Rightarrow \lambda_y = L_{Ey}\ /\ r_y = 144$

الجدول (2-1) $p_y = 275\ N/mm^2\ ,\ \ \varepsilon = (275/p_y)^{1/2} \Leftarrow T = 10.9 < 16\, mm$

– المقطع ليس نحيفاً لأن

الجدول (2-2) $b/T = 6.72 < 15\,\varepsilon = 15$

$D/t = 34.2 < 39\,\varepsilon = 39$

– بالعودة للجدول (2-4) نجد أن مقاومة الضغط p_c تحدد من الجدول

(4-3b) بدلالة p_y و λ_y فنجد: $p_c = 80\ N/mm^2$

– تحسب قوة تحمّل المقطع على الضغط كما يلي:

العلاقة (4-1) $P_c = A_g\ p_c = 47.4 \times 100 \times 80 \times 10^{-3} = 379.0\ kN > 338\ kN \quad o.k.$

* تصميم الوتر الداخلي

– يتضح من جدول القوى أن قوة الضغط العظمى في العنصر (11) تساوي *239 kN*

– نختار المقطع القياسي $203 \times 133 \times 30\, UB$ ذي المواصفات التالية:

$D = 206.7\ mm\ ,\ B = 134\ mm\ ,\ t = 6.3\ mm\ ,\ T = 9.6\ mm$

$b/T = 6.72\ , D/t = 27.3\ , r_x = 8.71\ cm\ , r_y = 3.18\ cm\ , A = 38\ cm^2$

– يحدد الطول الفعال ونسبة النحافة للعنصر (11) كما يلي:

الجدول (4-4)

$L_{Ex} = 0.85\ L = 0.85 \times 500 = 425\ cm \Rightarrow \lambda_x = L_{Ex}/r_x = 48.8$

$L_{Ey} = 1.0\ L = 1.0 \times 500 = 500\ cm \Rightarrow \lambda_y = L_{Ey} / r_y = 157$

$p_y = 275\ N/mm^2\ ,\ \ \varepsilon = (275/p_y)^{1/2} = 1.0 \Leftarrow T = 9.6 < 16\ mm$

– المقطع ليس نحيفاً لأن

$b/T = 6.97 < 15\,\varepsilon = 15$

$D/t = 9.6 < 39\,\varepsilon = 39$

– بالعودة للجدول (4-2) نجد أن مقاومة الضغط p_c تحدد من الجدول (4-3b) بدلالة p_y و λ_y فنجد: $p_c = 68\ N/mm^2$

– تحسب قوة تحمّل المقطع على الضغط كما يلي:

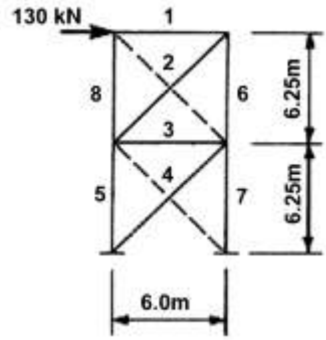
$P_c = A_g\ p_c = 38 \times 100 \times 68 \times 10^{-3} = 258\ kN > 239\ kN \quad o.k.$

– على فرض أنه سيتم وصل العنصر (11) مع العنصر المجاور له بواصلة براغي تستخدم برغيين في كل جناح وبرغيين في الجسد وأن قطر الثقب المنفذ لكل برغي يساوي 26 mm فإن المساحة الصافية

للمقطع تساوي $A_{net} = 38 - (4 \text{ x } 2.6 \text{ x } 0.96 + 2 \text{ x } 2.6 \text{ x } 0.63) = 24.74 \, cm^2$ – ومنه تحسب المساحة الفعالة كما يلي: $A_e = 1.2 \, A_{net} = 1.2 \text{ x } 24.74 = 29.7 \, cm^2 \; < \; A = 38 \, cm^2$ فتحسب طاقة تحمل العنصر على الشد كما يلي: $P_t = A_e \; p_y = 29.7 \text{ x } 100 \text{ x } 275 \text{ x } 10^{-3} = 816 \;\; kN > 299 \, kN \quad o.k.$ * تصميم العنصر القطري (4) – يتضح من جدول القوى أن قوة الضغط العظمى تساوي *172 kN* وأن قوة الشد العظمى *215 kN* – نختار المقطع القياسي $203 \text{ x } 133 \text{ x } 30 \, UB$ مماثل لمقطع الوتر الداخلي – يحدد الطول الفعال ونسبة النحافة العظمى كما يلي: $L_{Ey} = 1.0 \, L = 1.0 \text{ x } 583 = 583 \; cm \;\; \Rightarrow \lambda_y = L_{Ey} \, / \, r_y = 183$ – بالعودة للجدول (2-4) نجد أن مقاومة الضغط p_c تحدد من الجدول (4-3b) بدلالة $p_y \; , \; \lambda_y$ فنجد : $p_c = 52 \; N / mm^2$ – تحسب قوة تحمل المقطع على الضغط كما يلي: $P_c = A_g \; p_c = 38 \text{ x } 100 \text{ x } 52 \text{ x } 10^{-3} = 197.6 \;\; kN > 172 \, kN \quad o.k.$ – كما أن طاقة تحمل العنصر على الشد تساوي *816 kN* أكبر من القوة المطبّقة *215 kN* – نستعمل المقطع $203 \text{ x } 133 \text{ x } 30 \, UB$ في كافة العناصر القطرية فتكون محققة.	الفقرة (3-2) العلاقة (3-1)

مثال : (15-2)

صمم شبكة التربيط الشاقولية التي تسند جائز الرياح في المثال السابق من فولاذ ماركته 43 مع العلم أن رد فعل جائز الرياح *93 kN* وأن الحمل الطولي الناتج عن فرملة الرافعة *12.0 kN* . يبين الشكل أدناه شبكة التربيط الشاقولية.



الحـــــل:

* هناك حالتي تحميل :

إما $F = 1.4 \text{ x } 93 = 130 \quad kN$

أو $F = 1.2 \text{ x } 93 + 1.2 \text{ x } 12 = 126 \quad kN$

إذاً نصمم من أجل $F = 130 \quad kN$

يبين الجدول أدناه القوى المصعدة في عناصر جملة التربيط (الضغط موجب)

العنصر	1	2	3	4	5	6	7	8
القوة (kN)	130	- 188	130	- 188	- 135	135	270	0

يجب الانتباه إلى أنه تم استخدام عناصر قطرية متصالبة لتعمل على الشد فقط.

* تصميم العنصرين القطريين (2) و (4)

- يتضح من جدول القوى أن قوة الشد المطبّقة $F_t = 188\ kN$

- نستخدم مقطع زاوية منفردة 100 x 65 x 7 موصولة بساقها الطويل ببرغي إلى عقد جملة التربيط وأن قطر الثقب المعدّ للبرغي $22\,mm$

العلاقة (3-3)

$p_y = 275\ N/mm^2 \Leftarrow t = 7\ mm$

- تحسب المساحة الفعالة لمقطع الزاوية كما يلي:

$A_e = a_1 + 3\,a_1\,a_2/\left(3\,a_1 + a_2\right)$

حيث

$a_1 = \left(100 - 7/2\right) \text{ x } 7 - 22 \text{ x } 7 = 522\ \ mm^2$

$a_2 = \left(65 - 7/2\right) \text{ x } 7 = 431\ \ mm^2$

$A_e = 522 + 3 \text{ x } 522 \text{ x } 431 / \left(3 \text{ x } 522 + 431\right) = 860\ \ mm^2$

- تحسب طاقة تحمل العنصر للشد كما يلي:

العلاقة (3-1)

$P_t = A_e\ p_y = 860 \text{ x } 275 \text{ x } 10^{-3} = 237\ kN > 188 \qquad o.k.$

* تصميم العنصر (3)

- يتبين من جدول القوى أن العنصر يخضع إلى قوة ضغط

$F_c = 130\ \ kN$

- نختار مقطعاً قياسياً $203 \text{ x } 133 \text{ x } 125\,UB$ خواصه كما يلي:

$D = 275\ mm\ ,\ B = 101.9\ mm\ ,\ t = 6.1\ mm\ ,\ T = 8.4\ mm$

$b/t = 6.07\ ,\ D/t = 36.9\ ,\ r_x = 8.54\ cm\ ,\ r_y = 3.1\ cm$

$A = 32.2\ cm^2$

الجدول (2-1)

$\varepsilon = \left(275/p_y\right)^2 = 1.0\, ,\ p_y = 275\ N/mm^2 \Leftarrow T = 8.4\,mm < 16$

$L_E = 1.0 \text{ x } L = 1.0 \text{ x } 600 = 600\ cm \Rightarrow \lambda_y = L_R / r_y = 194$

	– بالعودة للجدول (4-2) نجد أن مقاومة الضغط p_c تحدد من الجدول (4-3b) بدلالة p_y و λ_y فنجد : $p_c = 46\ N / mm^2$ – تحسب قوة تحمل المقطع على الضغط كما يلي: $P_c = A_g\ p_c = 32.2 \text{ x } 100 \text{ x } 46 \text{ x } 10^{-3} = 149\ kN > 130\ \ kN \quad o.k.$ * يجب أخذ القوى في جائز الركبة (1) وفي عناصر الإطار الرئيسي (5, 6, 7) بالحسبان عند تصميم هذه العناصر على الأحمال الأخرى التي تخضع لها هذه العناصر.

الفصل السادس عشر

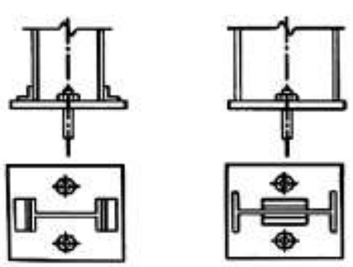
قواعد الأعمدة

Column bases

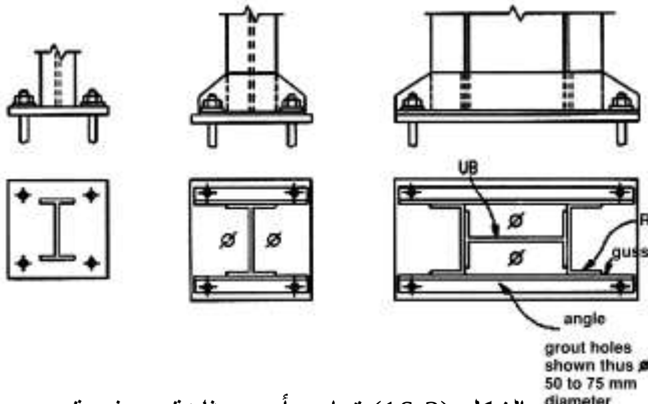
16 - 1 مقدمـــــة:

صفيحة القاعدة هي صفيحة فولاذية تُثبَّت باللحام في أسفل العمود لتوزع أحمال العمود إلى الأساس الخرساني وتثبت بالأساس بواسطة براغي تثبيت تتحمل القص وأي قوى شد تنشأ بين الصفيحة والأساس الخرساني نتيجة العزم في أسفل العمود. عندما تكون صفيحة القاعدة صغيرة وكذلك براغي التثبيت لا تنشأ إعاقة ملموسة لحركة أسفل العمود الدورانية ويُعتبَر عندها استناد العمود مفصلياً. وعلى العكس عندما لا يُسمَح لقاعدة العمود بالدوران، على الرغم من صعوبة تحقيق ذلك، تُسمَّى القاعدة ثابتة (وثاقة).

تُستخدَم القواعد المفصلية في الإطارات البابية وفي الأبنية متعددة الطوابق، أما القواعد الثابتة فتستخدم بشكل رئيسي في الإطارات البابية وفي الأبنية الطابقية قليلة الارتفاع وخاصة ذات العقد الصلبة. ويبين الشكلين (16-1,2) بعض القواعد من النوعين



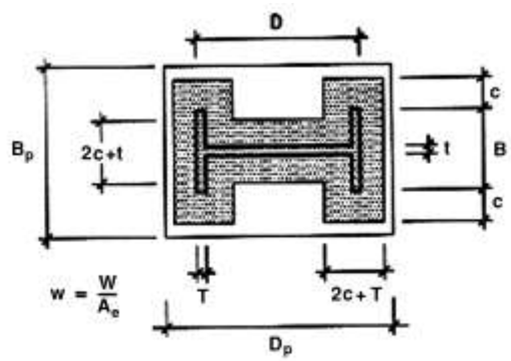
الشكل (16-1) قواعد أعمدة مفصلية نموذجية



الشكل (16-2) قواعد أعمدة ثابتة نموذجية

2 – 16 تصميم القواعد المفصلية

سنفرض أن صفيحة القاعدة ستنقل حمل العمود المحوري F إلى الأساس الخرساني بتوزيعه على مساحة فعالة A_e من سطح الاستناد الخرساني، تحدد كما في الشكل (16-3) بنشر الحمل خلال الصفيحة بعيداً عن محيط العمود بمسافة قدرها c.



الشكل (16-3) المساحة الفعالة

تحسب المساحة الفعالة A_e من الشكل (16-3) كما يلي:

$$A_e = 2\left(B+2c\right)\left(2c+T\right)+\left(D-2T-2c\right)\left(2c+t\right) \qquad (16\text{-}1)$$

حيث تُعرَّف المقادير t, T, D, c, B كما في الشكل (16-3).

يتوزع الحمل F كضغط منتظم على كامل المساحة A_e ويجب أن لا يزيد هذا الضغط على مقاومة السطح الساند للصفيحة على التحمّل $f_b = 0.5\ f'_c$

حيث: f'_c المقاومة المميزة الاسطوانية للخرسانة أو المونة الاسمنتية التي تسند الصفيحة بعمر 28 يوماً.

$$w = \frac{F}{A_e} \ \leq \ 0.5\ f'_c \qquad (16\text{-}2)$$

نحصل على مسافة انتشار الحمل c بعيداً عن حدود مقطع العمود بحل العلاقتين (16-1) و (16-2) ولكن يجب الانتباه إلى أنه لا يجوز أن تتجاوز c حدود صفيحة الاستناد وأن لا يتم تداخل في أجزاء المساحة A_e

يحسب العزم المطبّق على شريحة عرضها 1 mm من صفيحة الاستناد وبارزة بطول c من وجه العمود وفق العلاقة التالية:

$$M = \frac{1}{2}\, w\, \mathrm{c}^2 \ \leq \ p_{yp}\ Z_p \qquad (16\text{-}3)$$

حيث : p_{yp} المقاومة التصميمية لفولاذ صفيحة الاستناد، على أن لا تزيد على $270\ N/mm^2$

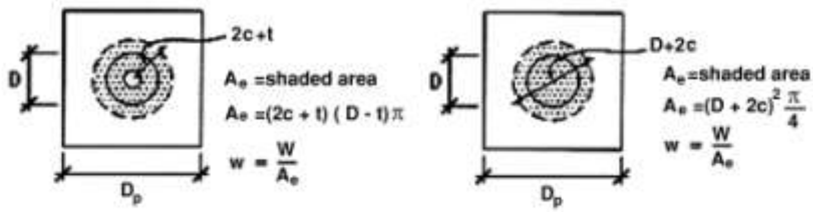
$Z_p = t_p^2/6$ معامل المقطع المرن لشريحة عرضها 1 mm من صفيحة الاستناد وسماكتها t_p

تحسب سماكة صفيحة الاستناد بتعويض Z_p في العلاقة (16-3) لينتج

$$t_p = c\left(3\,w/\,p_{yp}\right)^{1/2} \qquad (16\text{-}4)$$

ويجب أن لا تقل سماكة صفيحة الاستناد بحال من الأحوال عن سماكة جناح مقطع العمود.

تُطبَّق طريقة المساحة الفعالة أيضاً على المقاطع الصندوقية والأنبوبية المفرّغة، ويبين الشكل (16-4) بعض هذه المقاطع والمساحات الفعالة لصفائح القاعدة



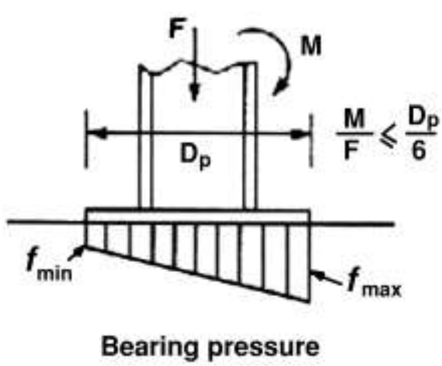
الشكل (16-4) المساحة الفعالة لصفائح استناد مقاطع مفرغة

16 – 3   تصميم القواعد المحملة لا مركزياً

تتعرض قواعد الأعمدة إلى عزوم انعطاف حول محور أو محورين متعامدين إضافة إلى القوى المحورية والقاصة وذلك عندما لا يُسمَح لقواعد الأعمدة بالدوران ونميز الحالتين التاليتين:

16 - 3 -1 الضغط موزع على كامل صفيحة القاعدة

عندما يكون العزم صغيراً بالمقارنة مع القوة الناظمية يتوزع الضغط على كامل سطح صفيحة القاعدة. ويبين الشكل (16-5) مثالاً على ذلك حيث F و M الحمل الناظمي والعزم المطبقين على القاعدة و B_p و D_p بعدي صفيحة القاعدة.



الشكل (16-5) الضغط موزع على كامل القاعدة

حتى يتعرض كامل صفيحة القاعدة إلى ضغط يجب أن يكون الضغط الأصغري أكبر أو يساوي الصفر أي:

$$f_{min} = \frac{F}{A} - \frac{M}{Z} \;\; \geq \;\; 0 \qquad (16\text{-}5)$$

حيث : $A = B_p D_p$, $Z = B_p D_p^2/6$, $M = Fe$, e اللامركزية

وعليه تكتب العلاقة (16-5) كما يلي

$$\frac{F}{B_p D_p} - \frac{F\,e}{B_p\, D_p^2/6} \;\geq\; 0 \;\Rightarrow\; e \;\leq\; D_p/6 \qquad (16\text{-}6)$$

إذاً كي تكون صفيحة القاعدة مضغوطة بكاملها يجب أن لا تزيد اللامركزية e عن سدس طول صفيحة القاعدة.

ويجب أن لايتجاوز الضغط الأعظمي مقاومة السطح الساند للصفيحة على التحمّل $f_b = 0.5 f_c'$ حيث f_c' المقاومة المميزة الاسطوانية للخرسانة أو المونة الاسمنتية التي تسند الصفيحة عند عمر 28 يوماً.

$$f_{max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{Z} \;\leq\; f_b \qquad (16\text{-}7)$$

فإذا تم اختيار طول الصفيحة محققاً العلاقة (16-6) يحسب عرض الصفيحة من العلاقة (16-7).

كما تحسب سماكة الصفيحة بأخذ شريحة منها عرضها 1 mm وبارزة من وجه العمود إلى طرف الصفيحة الذي يتعرض إلى الضغط f_{max} . يجب أن يكون العزم المطبّق على هذه الشريحة عند وجه العمود (M_s) أصغر أو يساوي طاقة تحمّل الشريحة على العزم أي :

$$M_s \;\leq 1.2\; p_{yp}\; Z_p \qquad (16\text{-}8)$$

حيث:

p_{yp} المقاومة التصميمية لفولاذ صفيحة الاستناد على أن لا يزيد على $270\ N/mm^2$.

$Z_p = t_p^2/6$ معامل المقطع المرن لشريحة عرضها $1\ mm$ من صفيحة الاستناد وسماكتها t_p. وبناءً على ذلك تُحدَّد سماكة الصفيحة وفق العلاقة التالية:

$$t_p \geq \left(\frac{6\,M_s}{1.2\ p_{yp}} \right)^{1/2} \qquad (16\text{-}9)$$

عند تصميم لحام العمود مع صفيحة القاعدة يمكن تبني الفرضيات التالية:

* تنتقل القوة الناظمية F من العمود إلى الصفيحة مباشرةً.
* يقاوم لحام الجناحين مع الصفيحة العزم M المطبّق من العمود على الصفيحة فتحسب القوة المطبّقة على لحام كل جناح وفق العلاقة التالية:

$$F_f = M/(D-T) \qquad (16\text{-}10)$$

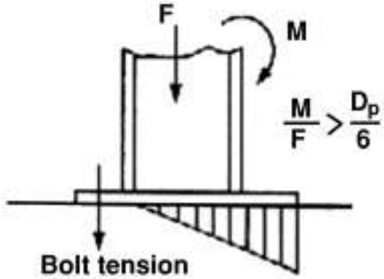
حيث D و T ارتفاع مقطع العمود وسماكة جناحه على الترتيب.

* يقاوم لحام الجسد القوة القاصة المطبّقة من العمود على الصفيحة.

أما براغي التثبيت فتحسب لتتحمل قوة القص الأفقية التي تنتقل من صفيحة القاعدة إلى أساس الخرسانة وذلك لعدم تعرضها لأية قوة شادّة.

16 - 3 -2 الضغط موزع على جزء من الصفيحة

يكون جزء من صفيحة القاعدة مضغوطاً عندما تكون اللامركزية $e = M/F$ أكبر من سدس طول القاعدة كما هو مبين في الشكل (16-6) وتتعرض براغي التثبيت في أحد طرفي القاعدة إلى قوة شادّة.



الشكل (16-6) قاعدة مضغوطة جزئياً

يوجد طريقتان لتحليل وتصميم هذا النوع من القواعد:

الطريقة الأولى:

تعتمد على فرضية التوزع الخطي للإجهادات بين صفيحة الاستناد والأساس الخرساني كما هو مبين في الشكل (16-7).

باستخدام فرضية المقاطع المستوية قبل التشوه تبقى مستوية بعد التشوه نكتب:

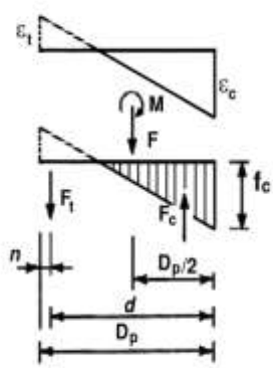
$$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_c} = \frac{d-x}{x} \qquad (16\text{-}11)$$

$$\varepsilon_t = f_t / E_s \ , \ \varepsilon_c = f_c / E_c$$

حيث :

f_c , ε_c , E_c معامل المرونة والتشوه النسبي والإجهاد الأعظمي في الخرسانة.

f_t , ε_t , E_s معامل المرونة والتشوه النسبي والإجهاد الأعظمي في البراغي.



عرض الصفيحة B_p

الشكل (16-7)

تكتب العلاقة بين إجهاد الشد في فولاذ البراغي والإجهاد الأعظمي المطبّق على الخرسانة f_c باستخدام العلاقة (16-11) كما يلي:

$$f_t = m\ f_c \frac{d - x}{x} \qquad (16\text{-}12)$$

حيث $m = E_s/E_c = 15$

تحدد القوتان اللتان تتعرض لهما الصفيحة والبراغي المشدودة بالعلاقتين التاليتين

$$F_c = \frac{1}{2} B_{\mathrm{p}}\ x f_c \qquad (16\text{-}13)$$

$$F_t = A_t\ f_t = m\ A_t\ f_c\ \frac{d - x}{x} \qquad (16\text{-}14)$$

تكتب معادلة التوازن الشاقولي كما يلي:

$$F = F_c - F_t = f_c \left[\ \frac{1}{2}\ B_p x - m\ A_t\ \frac{d - x}{x}\ \right] \qquad (16\text{-}15)$$

وتكتب معادلة توازن العزوم حول محور الصفيحة كما يلي

$$M = F_c \left(\frac{D_p}{2} - \frac{x}{3} \right) + F_t \left(\frac{D_p}{2} - n \right) \qquad (16\text{-}16)$$

نعوض (16-13) و (16-14) في المعادلة السابقة ينتج:

$$M = \frac{1}{2}\ B_p\ x f_c \left(\frac{D_p}{2} - \frac{x}{3} \right) + m\ A_t\ f_c \left(\frac{D_p}{2} - n \right) \left(\frac{d - x}{x} \right)$$

$$M = f_c \left[\frac{1}{2}\ B_p\ x\ \left(\frac{D_p}{2} - \frac{x}{3} \right) + m\ A_t\ \left(\frac{D_p}{2} - n \right) \left(\frac{d - x}{x} \right) \right] \qquad (16\text{-}17)$$

تحتوي معادلتا التوازن (16-15) و (16-17) على مجهولين $(x\,,\, f_c)$. بحل هاتين المعادلتين ينتج المعادلة التكعيبية التالية:

$$x^3 - 3\,(d - d_1)\,x^2 + A_1\ x - A_1\ d\ = 0 \qquad (16\text{-}18)$$

حيث: $A_1 = 6\, m\, A_t\, d_1/B_p$, $e = M/F$, $d_1 = 0.5\,(d\text{-}n)+e$

تحدد قيمة x بحل المعادلة (16-18) وتعوض في المعادلة (16-15) فتحدد قيمة f_c ومن ثم تحدد قيمة f_t من المعادلة (16-12) وبذلك يكون قد تحدد الضغط المطبّق على الصفيحة والشد المطبّق على البراغي اللذين يجب أن لا يتجاوزا إجهاد تحمّل الخرسانة $f_b = 0.5\, f'_c$ ومقاومة الشد في البراغي p_t على الترتيب.

تحسب سماكة صفيحة القاعدة وفقاً للعلاقة (16–9) وكذلك يحسب اللحام بين الصفيحة والعمود كما جاء في الفقرة (16–3–1).

<u>الطريقة الثانية:</u>

تعتمد كما في النظرية الحدية للخرسانة المسلحة على أن توزع الإجهادات بين الصفيحة والخرسانة منتظماً كما هو مبين في الشكل (16-8)

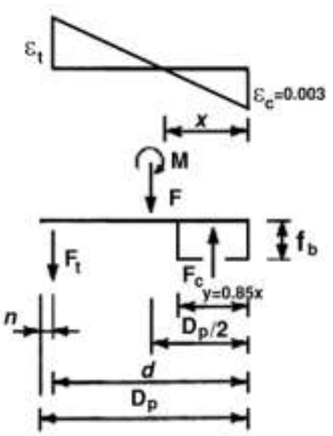
باستخدام فرضية المقاطع المستوية قبل التشوه تبقى مستوية بعد التشوه نكتب:

$$\frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_t} = \frac{0.003}{0.003 + f_t / E_s}$$

نعوض $E_s = 0.2 \text{ x } 10^6\ N/mm^2$

في العلاقة السابقة ينتج:

$$x = \frac{600}{600 + f_t}\ d \qquad (16\text{-}19)$$



الشكل (16-8)

ومنه يحدد ارتفاع منطقة الضغط كما يلي:

$$y = 0.85\, x = \frac{510}{600 + f_t}\, d \qquad (16\text{-}20)$$

تحدد القوتان اللتان تتعرض لهما الصفيحة والبراغي المشدودة بالعلاقتين التاليتين

$$F_c = B_p y\ f_b \qquad (16\text{-}21)$$

$$F_t = A_t\ f_t \qquad (16\text{-}22)$$

حيث B_p عرض صفيحة الاستناد.

تكتب معادلة التوازن الشاقولي كما يلي

$$F = F_c - F_t = B_p y\, f_b - A_t\, f_t \qquad (16\text{-}23)$$

وتكتب معادلة توازن العزوم حول محور الصفيحة كما يلي

$$M = F_c \left(\frac{D_p}{2} - \frac{y}{2} \right) + F_t \left(\frac{D_p}{2} - n \right) \qquad (16\text{-}24)$$

يُحدَّد العزم والقوة المحورية التوازنيان من شرط وصول إجهاد البيتون إلى طاقة تحمّله على الهس (التحمّل) في اللحظة التي يصل فيها فولاذ البراغي المشدودة إلى حد مقاومتها على الشد p_t . وبناءً عليه يحدد موقع المحور المحايد للمقطع وكذلك ارتفاع المنطقة المضغوطة بتعويض $f_t = p_t$ في العلاقتين (16- 19,20) فينتج:

$$x_b = \frac{600}{600 + p_t}\ d \ , \ y_b = \frac{510}{600 + p_t}\ d \qquad (16\text{- }25,26)$$

وكما هو مبين من هذه العلاقة أن x_b هو خاصة من خواص المقطع لا تتعلق بالأحمال المطبّقة.

بتبديل معطيات الشرط التوازني في العلاقة (16-23) نستنتج القوة الناظمية التوازنية التي يتحملها المقطع

$$F_b = B_p\, y_b\, f_b - A_t\, p_t \qquad (16\text{-}27)$$

وهي أيضاً خاصة من خواص المقطع لا علاقة لها بالأحمال الخارجية المطبّقة.

عندما تكون القوة المطبّقة الخارجية $F_b \geq F$ فإن ارتفاع المنطقة المضغوطة $x_b \geq x$. وبتعويض العلاقتين (16-19,25) في هذه المتراجحة ينتج أن $f_t = p_t$ أي أن إجهاد الشد في البراغي قد وصل إلى طاقة تحملها على الشد.

نعوض $f_t = p_t$ في العلاقة (16-23) فينتج ارتفاع المنطقة المضغوطة كما يلي:

$$y = \frac{1}{B_p \ f_b} \left(F + A_t \ p_t \right) \qquad (16\text{-}28)$$

ثم نعوض الناتج في العلاقة (16-24) لنستنتج العزم الذي تتحمله القاعدة أي:

$$M_u = B_p y \, f_b \left(\frac{D_p}{2} - \frac{y}{2} \right) + A_t \, p_t \left(\frac{D_p}{2} - n \right) \qquad (16\text{-}29)$$

يجب أن يكون M_u أكبر من العزم المطبّق الخارجي M وإلا يجب تغيير معطيات القاعدة $\left(A_t \ , \ D_p \ , B_p , \ n\right)$ كلاً أو جزءاً.

وعندما تكون القوة المطبّقة الخارجية $F_b \leq F$ فإن $x_b \leq x$ ومنه ينتج $p_t \geq f_t$ أي إن إجهاد الشد في البراغي أصغر أو يساوي طاقة تحملها على الشد ويحسب من العلاقة (16-19) التي تكتب على الشكل التالي:

$$f_t = 600 \ \frac{d - x}{x} = 600 \ \frac{0.85d - y}{y} \qquad (16\text{-}30)$$

نعوض إجهاد الشد f_t في العلاقة (16-23) فينتج ارتفاع منطقة الضغط من حل المعادلة التالية:

$$(B_p \, f_b) y^2 + (600 A_t - F) y - 510 \ A_t d = 0 \qquad (16\text{-}31)$$

ثم نعوض الناتج في العلاقتين (16-24,30) لنستنتج العزم الذي تتحمله القاعدة وفق العلاقة التالية:

$$M_u = B_p y \, f_b \left(\frac{D_p}{2} - \frac{y}{2} \right) + A_t \, f_t \left(\frac{D_p}{2} - n \right) \qquad (16\text{-}32)$$

وكما في الحالة السابقة يجب أن يكون $M \le M_u$ وإلا يجب تغيير معطيات القاعدة كلاً أو جزءاً.

تحسب سماكة صفيحة القاعدة بأخذ شريحة منها عرضها $1\ mm$ وبارزة من وجه العمود إلى طرف الصفيحة الذي يتعرض إلى الضغط f_b . يجب أن يكون العزم المطبّق على هذه الشريحة عند وجه العمود (M_s) أصغر أو يساوي طاقة تحمّل الشريحة على العزم أي :

$$M_s \le p_{yp} S_p \qquad (16\text{-}33)$$

حيث:

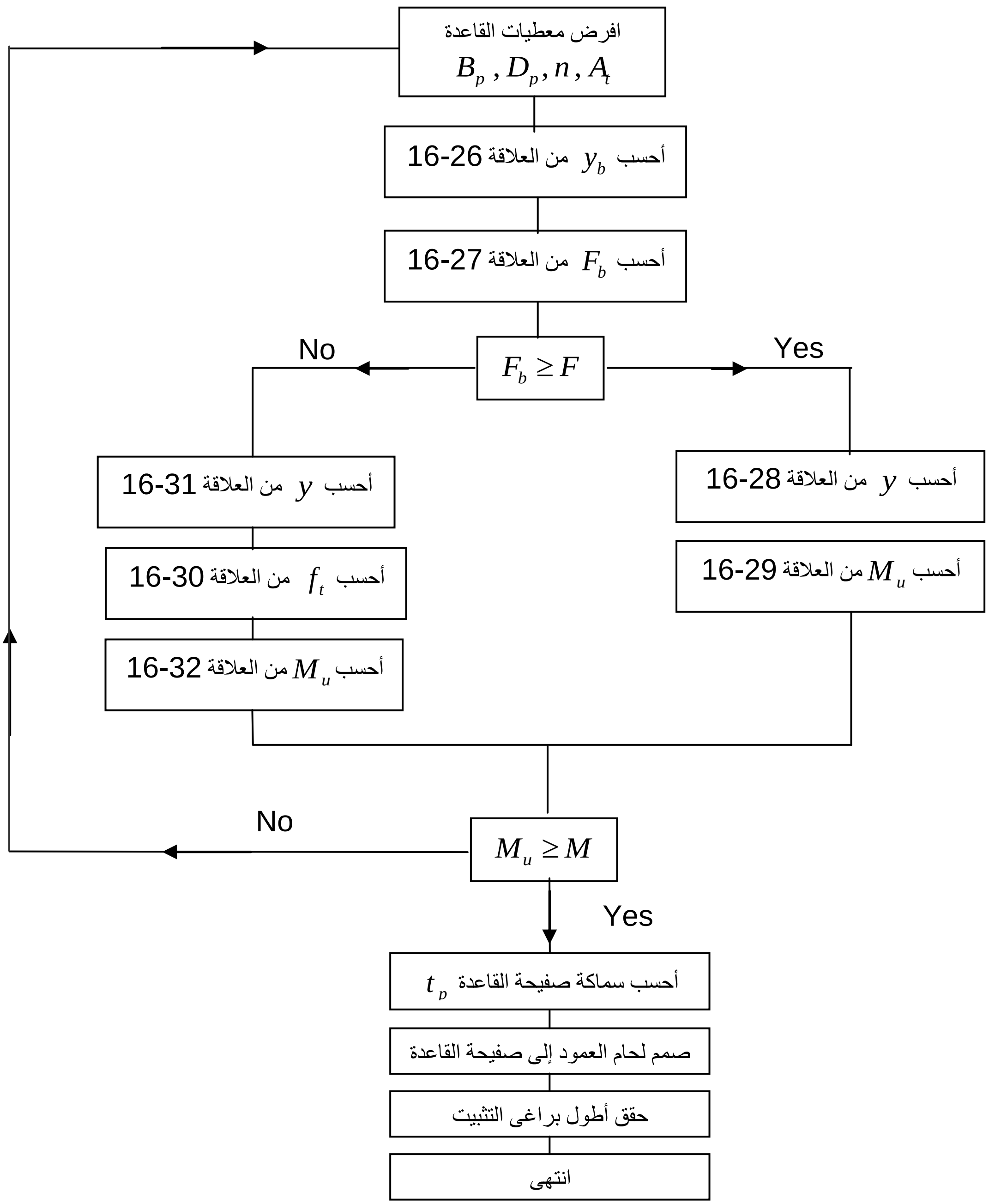
p_{yp} المقاومة التصميمية لفولاذ صفيحة الاستناد على أن لا يزيد على $270\ N/mm^2$.

$S_p = t_p^2/4$ معامل المقطع اللدن لشريحة عرضها $1mm$ من صفيحة الاستناد وسماكتها t_p . وبناءً على ذلك تُحدَّد سماكة الصفيحة وفق العلاقة التالية:

$$t_p \ge \left(\frac{4M_s}{p_{yp}}\right)^{1/2} \qquad (16\text{-}34)$$

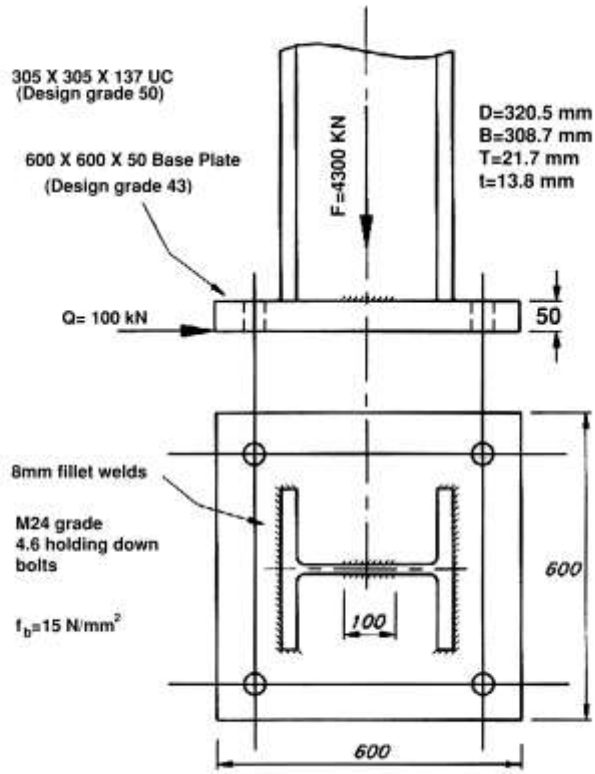
أما بالنسبة للحام بين صفيحة القاعدة والعمود فيحسب كما جاء في الفقرة (1–3–16).

يمكن تلخيص خوارزمية التصميم كما يلي:



مثال : (1-16)

حقق قاعدة العمود المبية في الشكل أدناه وذلك تحت تأثير القوى المصعّدة المبينة أيضاً.



الحـــــل :

* تحقيق أبعاد القاعدة

– تحسب المساحة الفعالة المطلوبة كما يلي:

$$A_{req} = F / f_b = 4300 \text{ x } 10^3 / 15 = 286.7 \text{ x } 10^3 \ \ mm^2$$

– تحسب المساحة الفعالة وفق العلاقة التالية:

العلاقة (16−1)

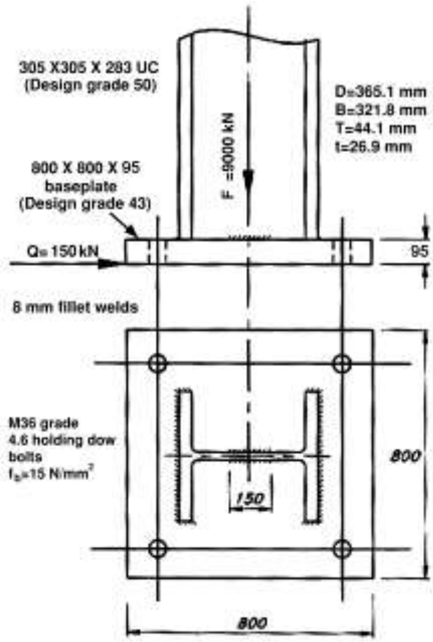
$$A_e = 2\left(B + 2\,c\right)\left(2\,c + T\right) + \left(D - 2\,T - 2\,c\right)\left(2\,c + t\right)$$

$$A_e = 2\left(308.7 + 2c\right)\left(2c + 21.7\right)$$
$$+ \left(320.5 - 2 \text{ x } 21.7 - 2c\right)\left(2c + 13.8\right)$$

	– بمساواة المساحة الفعالة بالمساحة المطلوبة ينتج المعادلة التربيعية التالية $$4\,c^2 + 1.82 \text{ x} 10^3\, c - 269.3 \text{ x} 10^3 = 0 \;\Rightarrow\; c = 117.6 \;\; mm$$ – لا يحدث تداخل في الإجهادات تحت الصفيحة لأن $\left(D - 2\,T\right)/\,2 = \left(320.5 - 2 \text{ x } 21.7\right)/\,2 = 138.5 \;\; > c$ – أبعاد صفيحة القاعدة كافية لأن $D + 2\,c \;= 320.5 + 2 \text{ x } 117.6 = 555.7 \; mm \;\; < \;\; D_p \; = 600 \; mm$ $B + 2\,c \;= 308.7 + 2 \text{ x } 117.6 = 543.9 \; mm \;\; < \;\; B_p \; = 600 \; mm$ – تحسب سماكة صفيحة القاعدة كما يلي:
العلاقة 16-4	$t_p = c\,\left(3\,f_b/p_{yp}\right)^{1/2} = 117.6\,\left(3 \text{ x } 15/255\right)^{1/2} = 49.4 \; mm \; < 50 \; mm$ إذاً السماكة المفروضة 50 mm كافية * تحقيق اللحام بين العمود والقاعدة – يحسب طول اللحام الفعال كما يلي: $l_{ew} = 2\,\left(l - 2\,s\right) = 2\,\left(100 - 2 \text{ x } 8\right) = 168 \; mm$ – بالعودة للجدول (5-10) نجد المقاومة التصميمية للحام $p_w = 215 \; N\,/mm^2$ – تحسب مقاومة اللحام على القص وفق العلاقة التالية: $P_w = p_w\; l_{ew} a = 215 \text{ x } 168 \text{ x } \left(0.7 \text{ x } 8\right) \text{ x } 10^{-3}$ $\quad = 202.3 \; kN \;\; > \;\; Q = 100 \; kN \qquad o.k.$

مثال : (16-2)

حقق قاعدة العمود المبينة في الشكل أدناه وذلك تحت تأثير القوى المصعّدة المبينة أيضاً.



الحـــــل :

* تحقيق أبعاد القاعدة

– تحسب المساحة الفعالة المطلوبة كما يلي:

$$A_{req} = F / f_b = 9000 \text{ x } 10^3 / 15 = 600 \text{ x } 10^3 \ \ mm^2$$

– تحسب المساحة الفعالة وفق العلاقة (16-1) كما يلي:

العلاقة 16-1

$$A_e = 2\left(321.8 + 2\,c\right)\left(2\,c + 44.1\right) + \left(365.1 - 2 \text{ x } 44.1 - 2\,c\right)\left(2\,c + 26.9\right)$$

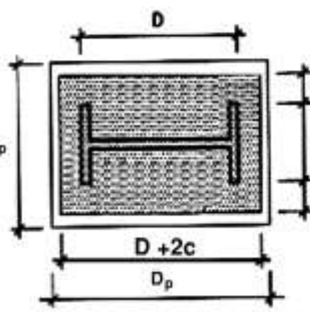
– بمساواة المساحة الفعالة بالمساحة المطلوبة ينتج المعادلة التربيعية التالية

$$4c^2 + 1.94 \times 10^3 c - 564 \times 10^3 = 0 \Rightarrow c = 204.5\ mm$$

- سيحدث تداخل في الإجهادات تحت الصفيحة لأن

$$(D - 2T)/2 = (365.1 - 2 \times 44.1)/2 = 138.4\ mm < c$$

إذاً لابد من إعادة حساب المساحة الفعالة مع أخذ التداخل في الإجهادات بالحسبان



- تحسب المساحة الفعالة كما هو مبين في الشكل جانباً وفق العلاقة التالية

$$A_e = (D + 2c)(B + 2c)$$
$$A_e = (365.1 + 2c)(321.8 + 2c)$$

- بمساواة المساحة الفعالة بالمساحة المطلوبة تنتج العلاقة التربيعية التالية:

$$4c^2 + 1374\ c - 482510.82 = 0 \quad \Rightarrow \quad c = 215.7\ mm$$

- أبعاد القاعدة كافية لأن

$$D + 2c = 365.1 + 2 \times 215.7 = 796.5\ mm < D_p = 800\ mm$$
$$B + 2c = 321.8 + 2 \times 215.7 = 753.2\ mm < B_p = 800\ mm \quad o.k.$$

- تحسب سماكة صفيحة القاعدة كما يلي:

العلاقة 16-4

$$t_p = c\left(3 f_b / p_{yp}\right)^{1/2}$$

- على فرض أن سماكة الصفيحة *95 mm* فإن

الجدول 2–1

$$p_{yp} = 245\ N/mm^2 < 270$$

$$t_p = 215.7\left(\frac{3 \times 15}{245}\right)^{1/2} = 92.5\ mm < 95\ mm \qquad o.k.$$

* تحقيق اللحام

- يحسب طول اللحام الفعال كما يلي:

$$l_{ew} = 2\ (l - 2\ s) = 2\ (150 - 2 \text{ x } 8) = 268\ mm$$

- بالعودة للجدول (5-10) نجد المقاومة التصميمية للحام

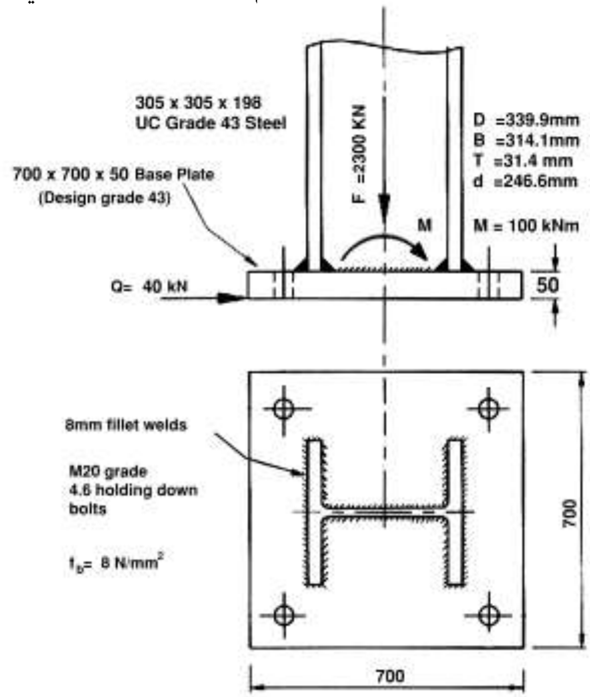
$$p_w = 215\ N/mm^2$$

- تحسب مقاومة اللحام على القص وفق العلاقة التالية:

$$P_w = p_w\ l_{ew}\ a = 215 \text{ x } 268 \text{ x } (0.7 \text{ x } 8)$$
$$= 322.7\ kN > Q = 150\ kN \qquad o.k.$$

مثال : (16-3)

حقق قاعدة العمود المبينة في الشكل أدناه من فولاذ ماركته 43 تحت تأثير تراكب الأحمال المصعّدة الناظمية والقاصّة وعزم الانعطاف المبينة في الشكل.



الحــــل :

* تحقيق أبعاد القاعدة

- تحدد لا مركزية القوة الناظمية كما يلي:

$$e = M / F = 100 \text{ x } 10^3 / 2300 = 43.5 \ mm \ < D_p/6 = 117 \ mm$$

إذاً تتعرض كل القاعدة إلى إجهادات ضاغطة

- تحدد الإجهادات الأعظمية والأصغرية تحت القاعدة كما يلي:

العلاقة 16-7

$$f_{\max} = \frac{F}{B_p \, D_p} + \frac{6\,\text{M}}{B_p \, D_p^2} = \frac{2300 \text{ x } 10^3}{700 \text{ x } 700} + \frac{6 \text{ x } 100 \text{ x } 10^6}{700 \text{ x } 700^2}$$

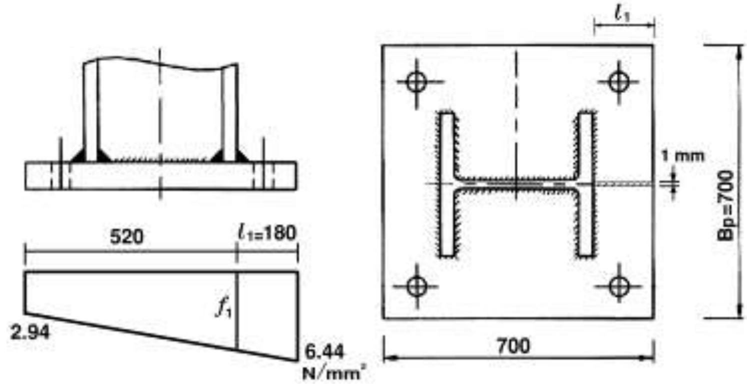
$$f_{\max} = 4.69 + 1.75 = 6.44 \ N \ < \ f_b = 8 \ N / mm^2 \qquad o.k.$$

$$f_{\min} = \frac{F}{B_p\ D_p} - \frac{6\,M}{B_p\ D_p^2} = 4.69 - 1.75 = 2.94\ \ N/mm^2$$

- ويحدد الإجهاد عند وجه العمود كما يلي:

$$f_1 = 6.44 - (6.44 - 2.94)\,x\,180/700 = 5.54\ N/mm^2$$

ويبين الشكل أدناه توزع الإجهادات تحت الصفيحة



- نأخذ شريحة من صفيحة القاعدة بعرض $1\ \ mm$ تمتد من وجه العمود حتى طرف الصفيحة كما هو مبين في الشكل أعلاه فيحدد العزم الأعظمي الذي تتعرض له الشريحة كما يلي:

$$M_s = \frac{1}{6}\ f_1\ l_1^2\ +\ \frac{1}{3}\ f_{\max}\ \ l_1^2 = \frac{1}{6}\ x\ 5.54\ x\ 180^2 + \frac{1}{3}\,x\ 6.44\ x\ 180^2$$
$$= 99.5\,x\,10^3\,N\ mm$$

- تحدد سماكة الصفيحة كما يلي:

العلاقة 16-9 الجدول 2-1

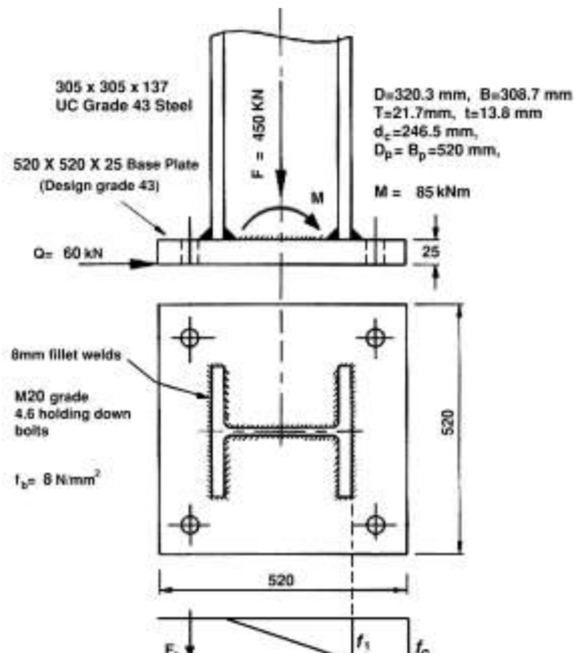
$$\left.\begin{array}{l} t_p\ = \left(\dfrac{6\ M_s}{1.2\ p_{yp}}\right)^{1/2} \\ p_{yp} = 255\ N/mm^2 \end{array}\right\} \Rightarrow \left.\begin{array}{l} t_p = \left(\dfrac{6\ x\ 99.5\ x\ 10^3}{1.2\ x\ 255}\right)^{1/2} \\ \quad = 44.2\,mm\ <\ 50\,mm \qquad o.k \qquad . \end{array}\right\}$$

بفرض $40\ mm\ \ \leq\ \ t_p$

* تحقيق لحام القاعدة مع العمود نفرض أنه تم قص العمود آلياً وبالتالي ستنتقل القوة الناظمية F مباشرةً إلى القاعدة، أما العزم M فينتقل إلى الصفيحة عبر لحام جناحي العمود وعليه تحدد القوة التي يتحملها لحام الجناح الواحد بالعلاقة التالية:	
$F_f = \dfrac{M}{D - T} = \dfrac{100 \text{ x } 10^3}{339.9 - 31.4} = 324 \ \ kN$	العلاقة 16-10
– تحدد القوة التي يتحملها لحام الجناح كما يلي:	
$\left.\begin{array}{l} P_w = p_w \, l_{ew} \, a \\ p_w = 215 \ \ N/mm^2 \\ l_{ew} = 2 \, B = 2 \text{ x } 314.1 = 628 \ mm \\ a = 0.7s = 0.7 \text{ x } 8 = 5.6 \ mm \end{array}\right\} \Rightarrow P_w = 756 \ k\,N > F_f \quad o.k.$	الجدول 10-5
– تحدد القوة التي يتحملها لحام الجسد كما يلي:	
$\left.\begin{array}{l} P_w = p_w \, l_{ew} \, a \\ p_w = 215 \ \ N/mm^2 \\ l_{ew} = 2 \, d = 2 \text{ x} 246.6 \\ \quad = 493 \ mm \\ a = 5.6 \ mm \end{array}\right\} \Rightarrow P_w = 593.5 \, k\,N > Q = 40 \ kN \quad o.k.$	

مثال : (16-4)

حقق الإجهادات تحت صفيحة قاعدة العمود المبين في الشكل أدناه مع فرض توزع الإجهادات خطياً وفقاً لنظرية المرونة وذلك تحت تأثير الأحمال المبينة على الشكل أيضاً واحسب سماكة صفيحة القاعدة المطلوبة من فولاذ ماركته 43. وكذلك حقق لحام العمود إلى صفيحة القاعدة وحقق برغيي التثبيت علماً أنه استخدم برغيان 2M20 ماركة 4.6 من كل طرف



الحـــــل :

$$n = 50\ mm \ \Rightarrow\ d = 470\ mm,\ l_1 = (D_p - D)/2 = 99.85\ mm$$

– جزء من القاعدة مضغوط لأن:

$$e = M / F = 85 \text{ x } 10^3 / 450 = 189\ mm > D_p/6 = 86.7 mm$$

– يحدد طول المنطقة المضغوطة بتطبيق العلاقة (16-18)

$$d_1 = 0.5\,(d - n) + e = 0.5\,(470 - 50) + 189 = 399\ mm$$

$$\left.\begin{aligned} A_1 &= 6\,\mathrm{m}\,\mathrm{A_t}\,\mathrm{d_1} / B_p \\ m &= 15 \\ A_t &= 2 \times 245 = 490 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{aligned} A_1 &= 6 \times 15 \times 490 \times 399 / 520 \\ &= 33.8 \times 10^3\ mm^2 \end{aligned}$$

نعوض في العلاقة (16-18) فينتج

$$x^3 - 3(470 - 399)\,x^2 + 33.8 \times 10^3\ x - 33.8 \times 10^3 \times 470 = 0$$

أو $x^3 - 213\,x^2 + 33.8 \times 10^3\ x - 15886 \times 10^3 = 0 \Rightarrow x = 288\ mm$

– نعوض قيمة x في المعادلة (16-15) فينتج إجهاد الضغط الأعظمي f_c كما يلي:

$$450 \times 10^3 = f_c\,[0.5 \times 520 \times 288 - 15 \times 490\,(470 - 288)/288\,] \Rightarrow$$

$$f_c = 6.4\ N/mm^2 < f_b = 8\ Nmm^2 \qquad o.k.$$

– نعوض قيمة f_c في العلاقة (16-12) لتحديد قيمة إجهاد الشد في برغيي التثبيت فينتج

العلاقة 16-12 $$f_t = 15 \times 6.4 \times (470 - 288)/288 = 60.7\ \ N/mm^2$$

– تحدد قوتي الشد والقص المطبّقتين على البرغي الواحد كما يلي:

$$F_t = 60.7 \times 245 \times 10^{-3} = 14.9\,kN$$

$$F_s = Q/4 = 60/4 = 15\ kN$$

– يحدد إجهاد الضغط عند وجه العمود f_1 كما يلي:

$$f_1 = 6.4\,(288 - 99.85)/288 = 4.18\ N/mm^2$$

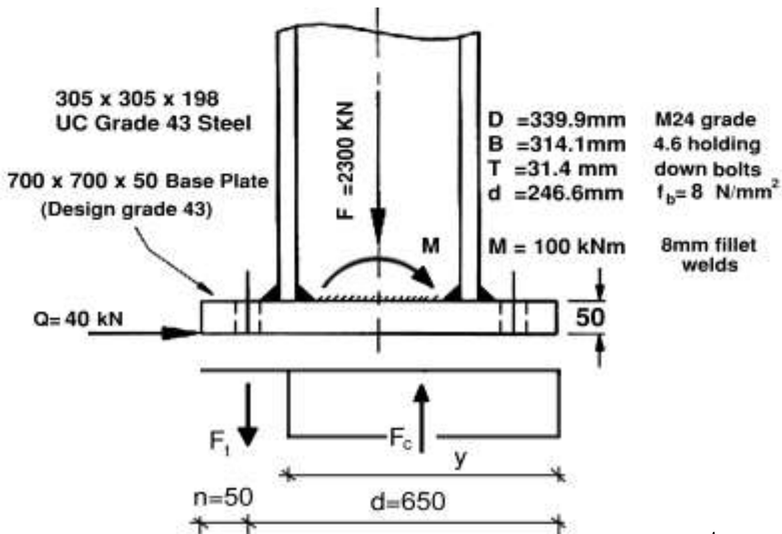
– يحدد العزم المطبق عند وجه العمود على شريحة عرضها $1\ mm$ كما يلي:

	$M_s = \left(\frac{1}{6} f_1 + \frac{1}{3} f_c\right) l_1^2 = \left(\frac{1}{6} \text{ x } 4.18 + \frac{1}{3} \text{ x } 6.4\right) 99.85^2$ $= 28215 \ N \ mm$
	– تحدد سماكة صفيحة القاعدة كما يلي:
العلاقة 16-9 الجدول 2-1	$\left.\begin{array}{l} t_p = \left(\dfrac{6 M_s}{1.2 p_{yp}}\right)^{1/2} \\ p_{yp} = 265 \ N/mm^2 \end{array}\right\} \Rightarrow t_p = \left(\dfrac{6 \text{ x } 28215}{1.2 \text{ x } 265}\right)^{1/2} = 23.1 \, mm$
	$t_p \geq 22 \, mm$ بفرض $\quad \mathrm{t_p} = 25 \, mm$ نختار
	– تحدد القوة المطبّقة على لحام الجناح كما يلي:
العلاقة 16-10	$F_f = M / (D - T) = 85 \text{ x } 10^3 / (320.3 - 21.7) = 284.7 \ kN$
	– تحدد القوة التي يتحملها لحام الجناح كما يلي:
الجدول 10-5	$\left.\begin{array}{l} P_w = p_w \, l_{ew} \, a \\ p_w = 215 \ N/mm^2 \\ l_{ew} \cong 2B = 2\text{x}308.7 = 617.4 \ mm \\ a = 0.7 \, \mathrm{s} = 0.7 \text{ x } 8 = 5.6 \ mm \end{array}\right\} \Rightarrow \left.\begin{array}{l} P_w = 215 \text{ x} 617.4 \text{ x} 5.6 \text{ x} 10^{-3} \\ \quad = 743 \ k \ N > F_f \quad o.k. \end{array}\right\}$
	– تحدد القوة التي يتحملها لحام الجسد كما يلي:
الجدول 10-5	$\left.\begin{array}{l} P_w = p_w \, l_{ew} \, a \\ p_w = 215 \ N/mm^2 \\ l_{ew} \cong 2 \, d_c = 2 \text{ x} 246.5 \\ \quad = 493 \ mm \\ a = 5.6 \ mm \end{array}\right\} \Rightarrow P_w = 593.5 \, k \ N > Q = 60 \ kN \, o.k.$
	– تحدد طاقة تحمّل البرغي على القص والشد كما يلي:

الجدول 10-2	$$\left.\begin{aligned} P_s &= p_s\, A_s \\ p_s &= 160\ \ N/mm^2 \\ A_s &= 245\ mm^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow\ P_s = 39.2\ kN$$
الجدول 10-2	$$\left.\begin{aligned} P_t &= p_t\, A_t \\ p_t &= 195\ \ N/mm^2 \\ A_t &= 245\ mm^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow\ P_t = 47.7\ kN$$
	– يتم تحقيق طاقة تحمّل البرغي بتطبيق علاقة الترابط (10-7) فينتج: $$\frac{F_s}{P_s}+\frac{F_t}{P_t}=\frac{15}{39.5}+\frac{14.9}{47.7}=0.7\ <\ 1.4 \qquad o.k.$$

مثال : (16-5)

أعد تحقيق قاعدة العمود المدروسة في المثال (16-3) تحت تأثير نفس الأحمال ولكن باستخدام الطريقة الحدية في توزيع الإجهادات بين صفيحة القاعدة والأساس الخرساني.



الحـــــل :

- باستخدام برغيين في منطقة الشد $2M20\ Gr4.6$ فإن:

$$A_t = 490\ mm^2\ \ ,\ p_t = 195\ N/mm^2$$

$$f_b = 8\ N/mm^2\ \ ,\ d = 700 - 50 = 650\ mm$$

- يحدد موقع المحور المحايد المقابل للشروط التوازنية وكذلك ارتفاع منطقة الضغط التوازنية كما يلي:

العلاقة 16-25

$$x_b = \frac{600}{600+195}\ \text{x}\ \ 650 = 490.5\,mm$$

$$y_b = 0.85\,x_b = 417\ mm$$

- تحدد القوة الناظمية التوازنية كما يلي:

العلاقة 16-27

$$F_b = (700 \text{ x } 417 \text{ x } 8 - 490 \text{ x } 195) \text{x} 10^{-3} = 2239.5 \; kN$$

- بما أن $F_b < F$ فإن $f_t < p_t$ وعليه يحدد ارتفاع منطقة الضغط بحل المعادلة التالية:

العلاقة 16-31

$$(B_p \; f_b) y^2 + (600 \; A_t - F) y - 510 \; A_t \; d = 0$$

$$(700 \text{ x } 8) y^2 + (600 \text{ x } 490 - 2300 \text{ x } 10^3) y - 510 \text{ x } 490 \text{ x } 650 = 0$$

أو:

$$y^2 - 358.2 \, y - 29006 = 0 \;\; \Rightarrow \;\; y = 426 \; mm$$

- يحدد إجهاد الشد في البرغيين كما يلي:

العلاقة 16-30

$$f_t = 600 \; (0.85 \text{ x } 650 - 426) / 426 = 178 \; N/mm^2 \;\; < p_t$$

- يحدد العزم الذي يمكن أن تتحمله صفيحة القاعدة كما يلي:

العلاقة 16-32

$$M_u = \left[700 \text{ x} 426 \text{x} 8 \; \left(\frac{700}{2} - \frac{426}{2} \right) + 490 \text{x} 178 \text{x} \; \left(\frac{700}{2} - 50 \right) \right] \text{x} 10^{-6}$$

$$= 353 \; kNm \;\; > \; M = 100 \; kN \qquad\qquad o.k.$$

- يحسب العزم M_s المطبّق على شريحة عرضها $1mm$ من صفيحة الاستناد عند وجه العمود كما يلي:

$$M_s = 8 \text{ x } 180^2 \; / \; 2 = 129600 \;\; N \, mm$$

- تحدد سماكة الصفيحة

(على فرض $t_p \; \geq \; 40 \; mm \;\; \Leftarrow \;\; p_{yp} = 255 \; N/mm^2$) كما يلي:

العلاقة 16-34

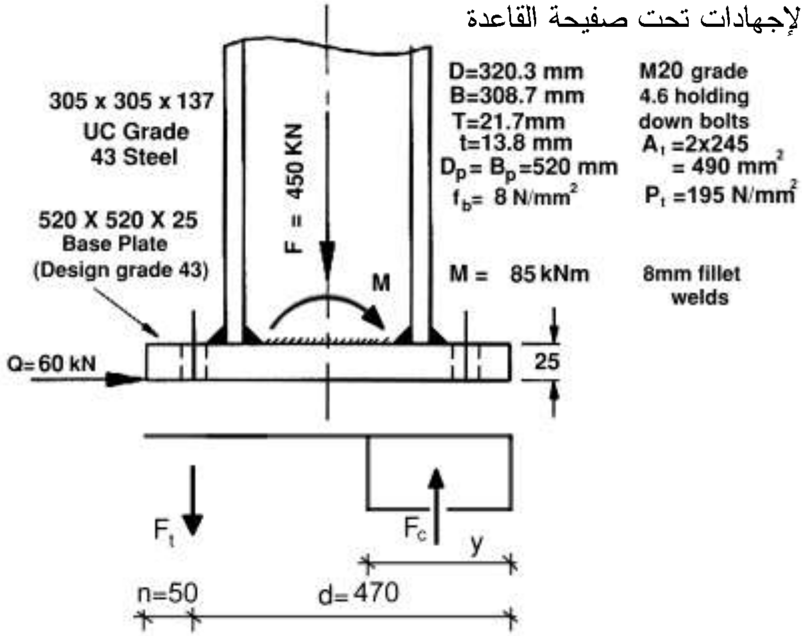
$$t_p = \left(\frac{4 \text{ x } 129600}{255} \right)^{1/2} = 45 \; mm$$

- يتم تحقيق اللحام تماماً كما في المثال (16-3)

	– تحدد قوتى الشد والقص المطبّقتين على البرغي الواحد كما يلي: $F_t = f_t\ A_t\ / 2 = 178 \text{ x } 490 / 2 \text{ x } 10^{-3} = 43.6\, kN/bolt$ $F_s = Q / 4 = 40 / 4 = 10\ kN / bolt$
الجدول 10-2	– تحدد طاقة تحمّل البرغي على القص كما يلي: $\left.\begin{array}{l} P_s = p_s\ A_s \\ p_s = 160\ \ N/mm^2 \\ A_s = 490/2 = 245\ mm^2 \end{array}\right\} \Rightarrow P_s = 160 \text{ x } 245 \text{ x } 10^{-3} = 39.2\, k\ N$
الجدول 10-2	– تحدد طاقة تحمّل البرغي على الشد كما يلي: $\left.\begin{array}{l} P_t = p_t\ (A_t/2) \\ p_t = 195\ \ N/mm^2 \\ A_t/2 = 245\ mm^2 \end{array}\right\} \Rightarrow P_t = 195 \text{ x } 245 \text{ x } 10^{-3} = 47.7\, k\ N$
العلاقة 10-7	– يتم التحقق من طاقة تحمّل البرغي بتطبيق علاقة الترابط (10-7) فينتج: $\frac{F_s}{P_s} + \frac{F_t}{P_t} = \frac{10}{39.2} + \frac{43.6}{47.7} = 1.17 \quad < \quad 1.4 \qquad\qquad o.k.$

مثال : (16-6)

حل المثال (16-4) وذلك باستخدام فرضيات النظرية الحدية في توزيع الإجهادات تحت صفيحة القاعدة



الحـــــل:

- يحدد موقع المحور السليم المقابل للشروط التوازنية وكذلك ارتفاع منطقة الضغط التوازنية كما يلي:

العلاقة 16-25

$$x_b = \frac{600}{600+195} \text{ x } 470 = 354.7\ mm$$

$$y_b = 0.85\, x_b = 301.5\, mm$$

- تحدد القوة الناظمية التوازنية

العلاقة 16-27

$$F_b = (520 \text{ x } 301.5 \text{ x } 8 - 490 \text{ x } 195) \text{ x } 10^{-3} = 1158.7\, kN$$

- بما أن $F_b > F = 450\, kN$ فإن $f_t = p_t$ وعليه يحدد ارتفاع منطقة الضغط كما يلي:

العلاقة 16-28	$y = \frac{1}{520 \text{ x } 8} \; (450 \text{ x } 10^3 + 490 \text{ x } 195) = 131.1 \; mm$
العلاقة 16-32	$M_u = \left[520 \text{ x}131.1\text{x } \; 8\left(\frac{520}{2} - \frac{131.1}{2}\right) + 490\text{x}195 \left(\frac{520}{2} - 50\right)\right] \text{x}10^{-6}$ $= 126 \; kNm$ إذاً $M_u = 126 \; kNm \; > M = 85 \; kNm \qquad o.k.$ – يحدد العزم عند وجـــه العمـــود الـــذي تتحمله شريحة عرضها $1mm$ كما يلي: $M_s = \frac{8 \text{ x } 99.85^2}{2} = 39880 \; Nmm$ – تحدد سماكة صفيحة القاعدة كما يلي:
العلاقة 16-34 الجدول 2-1	$\left.\begin{aligned} t_p &= \left(\frac{4 \, M_s}{p_{yp}}\right)^{1/2} \\ p_{yp} &= 265 \;\; N/mm^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow t_p = \left(\frac{4 \text{ x } 39880}{265}\right)^{1/2} = 24.5 \; mm$ بفرض $t_p \geq 22 \; mm$ نختار $t_p = 25 \; mm$ – يتم تحقيق لحامي الجناح والجسد تماماً كما في المثال (4-16) – تحدد قوتي الشد والقص المطبّقتين على البرغي الواحد كما يلي: $F_t = p_t (A_t / 2) = 195 \text{ x } 245 \text{ x } 10^{-3} = 47.7 \; kN$ $F_s = Q / 4 = 60 / 4 = 15 \; kN$ – تحدد طاقة تحمّل البرغي الواحد على الشد والقص كما في المثال (4-16) فينتج: $P_t = 47.7 \; kN$ و $P_s = 39.2 \; kN$ – يتم تحقيق طاقة تحمّل البرغي بتطبيق علاقة الترابط (7- 10) فينتج: $\frac{F_s}{P_s} + \frac{F_t}{P_t} = \frac{15}{39.5} + \frac{47.7}{47.7} = 1.38 \;\; < \;\; 1.4 \qquad o.k.$

الفصل السابع عشر

تصميم الإطار البابي

Portal Frame Design

17-1 مقدمـــــة

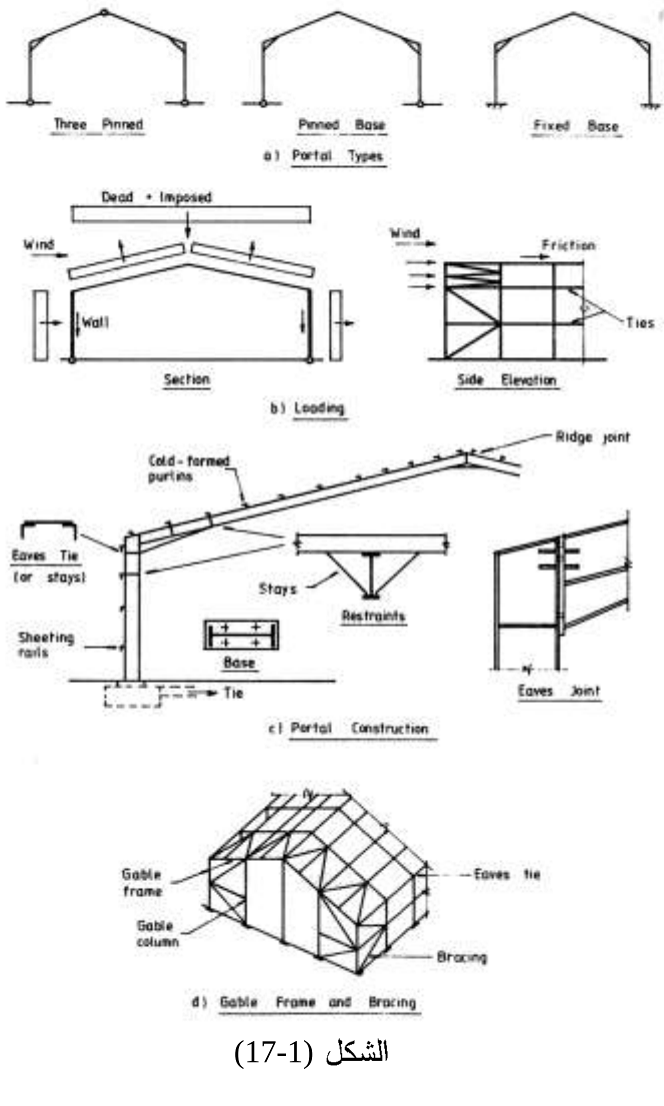
تُعتبَر جملة الإطار البابي من أكثر الجمل الإنشائية استعمالاً في الأبنية الصناعية لأنها أكثر جاذبية وتتطلب أقل صيانة وأقل تدفئة من جملة الجائز الشبكي. ويُصمَّم الإطار البابي إما بمفاصل ثلاث أومتمفصلاً مع قاعدتيه أو موثوقاً في أسفله،
ويبين الشكل (1-17) هذه الأنواع الثلاث. لكن الإطار المتمفصل مع قاعدتيه أكثر شيوعاً لأن قاعدتيه أصغر مما يجعله أكثر اقتصادية من الإطار الموثوق ومن جهة أخرى يُعتبَر تأمين وثاقه تامة مع القاعدة صعباً جداً. ولهذا سنتناول في هذا الفصل تصميم الإطار المتمفصل مع قاعدتيه فقط.

يقاوم الإطار الأحمال التي تقع في مستويه (الميتة والحية والرياح) بواسطة الفعل الإطاري الصلب، أما أحمال الرياح التي تتعامد مع مستويه فتُقاوَم بشبكات التربيط التي تُنفَّذ عادةً في الفتحة الأولى بين الإطارات في كل من طرفي البناء.

يسمح الكود BS 5950 بتصميم الإطار وفق إحدى منهجيتي التصميم المرن أو التصميم اللدن لكن الأخير أكثر شيوعاً لأنه يعطي حلولاً أكثر اقتصادية. وفي كلا المنهجيتين لابد من اتباع خطوات التصميم التالية:

- تحليل مرن أو لدن للإطار.
- تصميم عناصر الإطار مع الأخذ بالحسبان تحنيب الفتل الجانبي والقيود اللازمة لمنع التحنيب خارج مستوي الإطار.

- تدقيق الاستقرار الجانبي للإطار في مستويه.
- تصميم وصلات الإطار والتأكد من قيامها بنقل الأفعال التصميمية بين عناصر الإطار.
- تدقيق السهوم عند الركبة (منطقة التقاء العمود مع الجائز).



الشكل (17-1)

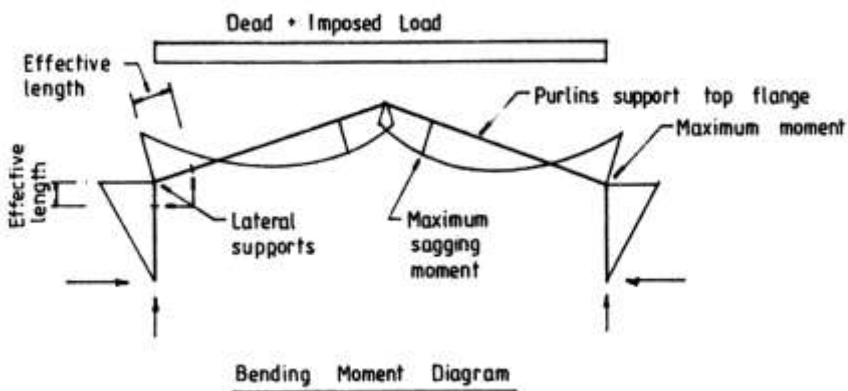
17-2 التصميم المرن Elastic design

يتم التحليل الإنشائي المرن للإطار إما يدوياً أو حاسوبياً تحت تأثير كل نوع من الأحمال (الميتة W_d والحية W_i والرياح W_w) ثم تُراكَب النتائج بعد ضربها بعامل التصعيد المناسب فينتج مجموعة من حالات التحميل أهمها:

* حالة التحميل الرئيسية : تراكب الأحمال الحية والميتة $1.4\,W_d + 1.6\,W_i$ ويبين الشكل (2-17) مخطط عزم انعطاف نموذجي ناتج عن هذه الحالة.
* حالات تراكب أحمال الرياح مع الأحمال الميتة الشاقولية:

$$1.2\,W_d + 1.2\,W_i + 1.2\,W_w$$

* حالات تراكب أحمال الرياح مع الأحمال الميتة: $1.0\,W_d + 1.4\,W_w$
* حالة تراكب الأحمال المصعّدة الشاقولية مع الأحمال الافتراضية المنصوص عليها في الفقرة (2-1-1)



الشكل (2-17)

يتم اختيار مقطع الجائز عادةً أخف من مقطع العمود بحوالي 30 – 40% ولتقوية الجائز في منطقة اتصاله مع العمود (الركبة) يتم إضافة كتف للجائز (شطفة) كما

هو مبين في الشكل (17-1c) والدور الرئيسي لهذه الشطفة هو تأمين ذراع مناسب للقوى في براغي الوصل. ولقد جرت العادة أن يتم إهمال تأثير هذه الشطفة أثناء التحليل الإنشائي للإطار، أما إذا كانت الشطفة كبيرة لابد من اعتبارها في التحليل الإنشائي لأنها تجذب عزوماً أكثر إلى نقطة اتصال الجائز مع العمود.

17-2-1 الأطوال الفعالة Effective lengths

– الأطوال الفعّالة للعناصر في مستوي الإطار: يتم تحويل الإطار إلى إطار مكافئ مستطيل كما في الشكل (17-3) وتُحدَّد الأطوال الفعّالة للعناصر كمايلي:

* الطول الفعّال للعمود: عندما تكون زاوية ميل السقف أقل من $10°$ يتم تحديد الطول الفعّال للعمود باستخدام المنحني (4-4b) الخاص بأعمدة الإطارات ذات العُقَد الصلبة والمسموح لها بالانزياح الجانبي مع اعتبار

$$k_1 = \frac{I_c / L_c}{\left(I_c/L_c\right) + \left(I_R/L_R\right)}$$

$k_2 = 1.0$ (الاتصال مع القاعدة مفصلي)

حيث :

I_c و I_R عزم عطالة مقطع العمود ومقطع الجائز حول محوريهما الرئيسيين على الترتيب.

L_c و L_R طول العمود وطول الجائز على الترتيب

وعندما تزيد زاوية ميل السقف على $10°$ يمكن تحديد الطول الفعّال للعمود وفق العلاقة التالية:

$$k_c = L_{Ec} / L_c = 2.0 + 0.45 \; \frac{I_c / L_c}{I_R/L_R} \qquad (17\text{-}1)$$

حيث : L_{Ec} الطول الفعّال للعمود.

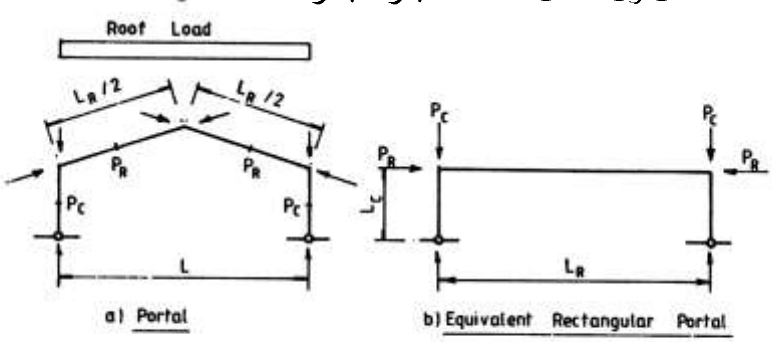
* الطول الفعّال للجائز: يعتمد الطول الفعّال للجائز على الطول الفعّال للعمود لأن الإطار ينهار كوحدة متكاملة عند بلوغ الحمل الحرج وعليه يُحدَّد الطول الفعّال للجائز من العلاقة التالية:

$$k_R = \frac{L_{ER}}{(L_R/2)} = k_c \; \frac{2\,L_c}{L_R} \sqrt{\frac{F_c \;\, I_R}{F_R \;\, I_c}} \qquad (17\text{-}2)$$

حيث :

F_c و F_R متوسط القوة المحورية التصميمية في كل من العمود والجائز على الترتيب.

L_{ER} الطول الفعّال لنصف مجاز الجائز.

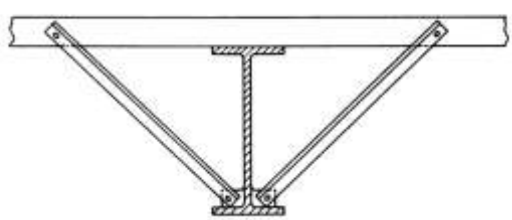


الشكل (17-3)

- الأطوال الفعّالة للعناصر خارج مستوي الإطار: على الرغم أن الجوائز الثانوية وسكك الجدران تقيد جانبياً جناح العمود وجناح الجائز الخارجيين إلا أنه من الضروري تأمين قيود جانبية للجناح الداخلي في بعض النقاط الحرجة فيصبح الجناحان مقيدين ضد الفتل أيضاً. تُحدَّد النقاط الحرجة في الإطار المتمفصل مع قاعدتيه والخاضع لعزم انعطاف ناتج عن الأحمال الشاقولية كالمبين في الشكل (17-2) في المواضع التالية.

* الركبة : يتم تأمين القيد إما عن طريق جائز عمودي على الركبة (eaves beam) ويصل بين الإطارات المتتالية أو بتركيب شداد (stay) يصل بين سكة الجدار في منطقة الركبة والجناح الداخلي للعمود كما في الشكل (17-1c).
* في النصف العلوي من العمود : (في أكثر من موقع إذا اقتضت الحاجة) ويتم تأمين القيد بتركيب شدّاد يصل بين سكة الجدار وجناح العمود الداخلي كما في الشكل (17-4).
* قرب نقطة انعدام العزم في الجائز : ويتم تأمين القيد أيضاً بتركيب شدّاد يصل بين الجائز الثانوي الأقرب إلى نقطة انعدام العزم والجناح السفلي للجائز كما في الشكل (17-4).

يبين الشكل (17-2) مواقع هذه النقاط الحرجة وكذلك الأطوال الفعّالة التي ستُستَخدَم في تحقيق تحنيب الفتل الجانبي.



الشكل (17-4)

17-2-2 تصميم العناصر ثابتة العطالة

يتم تصميم العمود ذي المقطع الثابت كعنصر يتعرض إلى قوة محورية وعزم انعطاف مسيطر وتتألف خطوات التصميم تحت تأثير حالة التحميل الحرجة (أحمال ميتة + أحمال حية) من ذات الخطوات المبينة في الفصل الثامن حيث يجب تحقيق

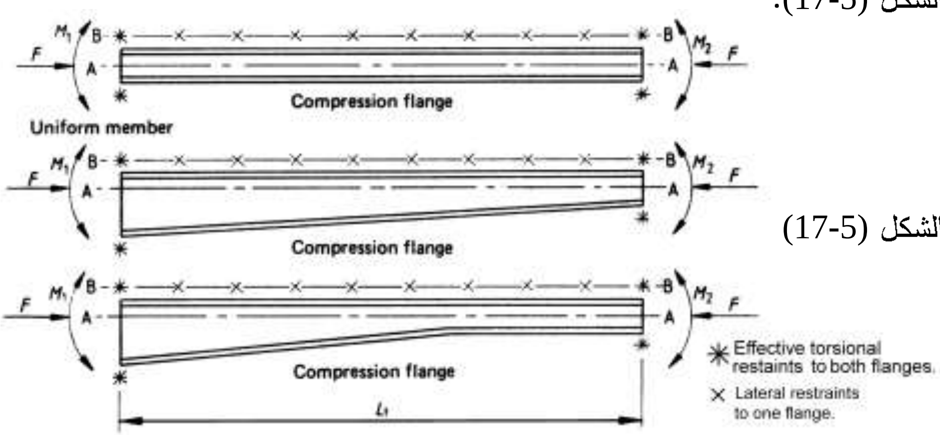
طاقة تحمّل العمود موضعياً وفقاً للعلاقة (8-1) وكذلك تحقيق العمود على التحنيب الكلي وفقاً للعلاقة (8-2).

يتألف الجائز من عنصر ذي مقطع ثابت مع شطفه في منطقة الركبة طولها حوالي 10% من طول الجائز وشطفة أخرى أصغر في منطقة ذروة الإطار. يبين الشكل (17-2) مخططاً نموذجياً لعزم الانعطاف الذي يتعرض له الجائز تحت تأثيرحالة التحميل الحرجة حيث يخضع الجناح السفلي للجائز إلى قوة ضاغطة في منطقة الركبة تتحول إلى قوة شادّة بعد نقطة انعدام العزم فيصبح عندها الجناح العلوي مضغوطاً فيتم تأمين استقراره بواسطة الجوائز الثانوية.

إذا كانت الشطفة قصيرة يمكن إهمال تأثيرها ويتم التصميم بناءً على العزم الأعظمي في الركبة ويتم تأمين قيد فتل للجناح السفلي عند أول أو ثاني جائز ثانوي بُعداً من الركبة وتستمر إجراءات التصميم تماماً كما في حالة العمود.

17-2-3 تصميم العناصر متغيرة العطالة

ينطبق مضمون هذه الفقرة على تصميم العناصر أو أجزاء العناصر الواقعة بين قيدي فتل فعّالين يحصران بينهما مجموعة من القيود تقيد الجناح المشدود كما في الشكل (17-5).



الشكل (17-5)

يجب تحقيق طاقة تحمّل العنصر موضعياً وفقاً لعلاقة الترابط (8-1) كما يجب تحقيق تحنيب العنصر أو جزء العنصر وفقاً للفقرة (8-3) مع اعتبار الطول الفعّال L_E مساوياً للمسافة بين القيود الجانبية، ولتجنب حدوث تحنيب فتل جانبي للعنصر أو لجزء العنصر الواقع بين قيدي فتل لابد من تحقيق أحد علاقتي الترابط التاليتين

* للعناصر ذات المقطع الثابت

$$\frac{F}{P_c}+\frac{\overline{M}}{M_b} \le 1 \qquad (17\text{-}3)$$

* للعناصر متغيرة العطالة : في أي مقطع

$$\frac{F}{A}+\frac{M}{S_x} \le p_b \qquad (17\text{-}4)$$

حيث :

M , F القوة المحورية وعزم الانعطاف المطبّقين على المقطع المدروس على الترتيب.

S_x , A مساحة المقطع المدروس ومعامله اللدن على الترتيب.

P_c طاقة التحمّل على الضغط وتُحدَّد وفقاً للفقرة (4-2) مع حساب نسبة النحافة حول المحور الضعيف وفق العلاقة التالية

$$\lambda_{Tc} = y\,\lambda \quad , \quad \lambda = L/r_y \qquad (17\text{-}5a,b)$$

$$y = \left[\frac{1+(2a/h_s)^2}{1+(2a/h_s)^2+0.05\,(\lambda/x)^2}\right]^{1/2} \qquad (17\text{-}6)$$

حيث :

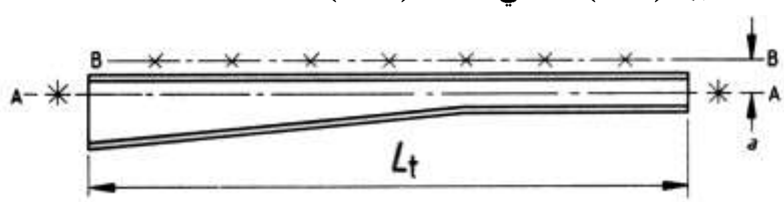
L المسافة بين قيدي الفتل.

r_y نصف قطر العطالة حول المحور الضعيف.

h_s المسافة بين مركزي قص الجناحين كما في الشكل (5-9).

x مؤشر الفتل ويمكن أن يؤخذ مساوياً D/T أو يحسب وفقاً للعلاقة (9-6) حيث D كامل ارتفاع المقطع و T سماكة جناحه.

a المسافة بين المحور المرجعي للعنصر (A-A) وبين محاور القيود الجانبية (B-B) كما في الشكل (17-6).



الشكل (17-6)

M_b العزم المقاوم لتحنيب الفتل الجانبي ويُحدَّد وفق العلاقة التالية

$$M_b = p_b\, S_x \;\le\; p_y\, Z_x \qquad (17\text{-}7)$$

p_y المقاومة التصميمية وتُحدَّد من الجدول (2-1).

Z_x معامل المقطع المرن حول المحور القوي.

p_b مقاومة الانعطاف وتُحدَّد من الجدولين (5-10,11) وفقاً لنوع المقطع والمقاومة التصميمية p_y ونسبة النحافة المكافئة حول المحور الضعيف λ_{TB} التي تُحسَب وفق العلاقة التالية:

$$\lambda_{TB} = n_t\, u\, v_t\, c\, \lambda \qquad (17\text{-}8)$$

$$v_t = \left[\frac{4\,a / h_s}{1 + (2\,a / h_s)^2 + 0.05\,(\lambda / x)^2} \right]^{1/2} \qquad (17\text{-}9)$$

$$c = 1 + \frac{3}{x-9}\,(R-1)^{2/3}\, q^{1/2} \qquad (17\text{-}10)$$

R نسبة ارتفاع المقطع الأكبر إلى ارتفاع المقطع الأصغر بين قيدي الفتل.

q نسبة الطول المتغير العطالة إلى طول الجزء المدروس بين قيدي الفتل.

u معامل التحنيب يأخذ بالحسبان نوع المقطع ومعامل وربه (warping) ويؤخذ مساوياً 0.9 للمقاطع المدرفلة (I و H ومجراية) ومساوياً 1.0 للمقاطع الأخرى، ويؤخذ دائماً مساوياً 1.0 للعناصر متغيرة العطالة.

n_t معامل تصحيح النحافة ويؤخذ مساوياً 1.0 عندما لايوجد حمولات مطبّقة بين القيود وإلا يُحدَّد وفق العلاقة التالية

$$n_t = \left\{ \frac{1}{12} \left[\frac{N_1}{M_1} + \frac{3\,N_2}{M_2} + \frac{4\,N_3}{M_3} + \frac{3\,N_4}{M_4} + \frac{N_5}{M_5} + 2\,(\frac{N_s}{M_s} - \frac{N_E}{M_E}) \right] \right\}^{1/2} \qquad (17\text{-}11)$$

$N_1 , ... , N_5$ قيم العزم المطبّق في بداية ونهاية ومنتصف ونقطتي ربع المسافة بين قيدي الفتل كما في الشكل (17-7). تؤخذ فقط القيم الموجبة لـــ N وتعتبر موجبة عندما تنتج ضغطاً في الجناح غير المقيّد.

$M_1 , ... , M_5$ طاقة تحمّل العزم للمقاطع المطبّق عليها $N_1 , ... , N_5$

وتُحدَّد طاقة تحمّل العزم للمقاطع المنتظمة بتطبيق العلاقة التالية

$$M_i = p_y\, Z_{xi} \qquad (17\text{-}12)$$

حيث : Z_x معامل المقطع المرن بالنسبة للجناح المضغوط

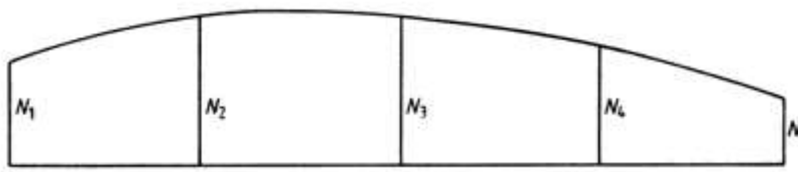
وتُحدَّد M في الحالات الأخرى وفق العلاقة التالية:

$$M_i = p_y\, \mathrm{S}_{xi} \qquad (17\text{-}13)$$

N_s / M_s تؤخذ الأكبر من N_2 / M_2 ، N_3 / M_3 ، N_4 / M_4

N_E / M_E تؤخذ الأكبر من N_1 / M_1 ، N_5 / M_5

تؤخذ بالحسبان القيم الموجبة فقط لــ $(\frac{N_s}{M_s} - \frac{N_E}{M_E})$



الشكل (17-7)

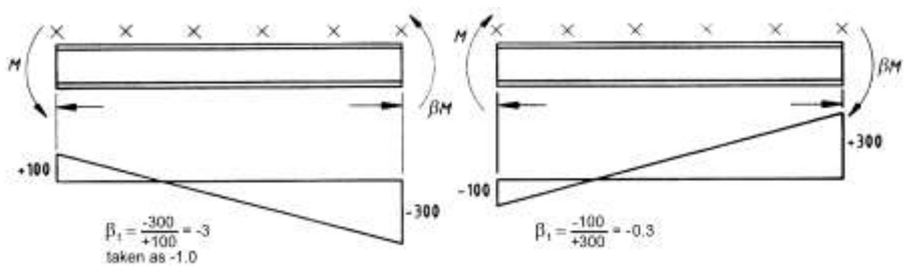
$\overline{M}$ عزم الانعطاف المنتظم المكافئ ويُحدَّد بالعلاقة التالية:

$$\overline{M} = m_t \, M_A \qquad (17\text{-}14)$$

M_A العزم الأعظمي المطبّق على الجزء المدروس.

m_t معامل العزم المنتظم المكافئ ويؤخذ مساوياً 1.0 عندما يكون الجزء بين قيدي الفتل محمّلاً وإلا فيُحدَّد من الجدول (17-1) بدلالة y المحددة بالعلاقة (17-6) و β_t

β_t نسبة العزم الأصغر جبرياً إلى العزم الأكبر اللذين يخضع لهما طرفي الجزء المدروس، ويُعتبَر العزم موجباً إذا كان يُنتِج ضغطاً في الجناح غير المقيد. انظر الشكل (17-8) . وتؤخذ $\beta_t = -1.0$ عندما $\beta_t < -1$



الشكل (17-8)

الجدول (17-1) Equivalent uniform moment factor, m_t

β_t \ γ	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
-1.0	1.00	0.76	0.61	0.51	0.44	0.39	0.35	0.31	0.28	0.26	0.24	0.22	0.21
-0.9	1.00	0.78	0.63	0.52	0.45	0.40	0.36	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23
-0.8	1.00	0.80	0.64	0.53	0.46	0.41	0.37	0.34	0.32	0.30	0.28	0.27	0.26
-0.7	1.00	0.81	0.66	0.55	0.47	0.42	0.39	0.36	0.34	0.32	0.30	0.29	0.28
-0.6	1.00	0.83	0.67	0.56	0.49	0.44	0.40	0.38	0.36	0.34	0.33	0.32	0.31
-0.5	1.00	0.85	0.69	0.58	0.50	0.46	0.42	0.40	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34
-0.4	1.00	0.86	0.70	0.59	0.52	0.48	0.45	0.43	0.41	0.40	0.39	0.38	0.37
-0.3	1.00	0.88	0.72	0.61	0.54	0.50	0.47	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.41
-0.2	1.00	0.89	0.74	0.63	0.57	0.53	0.50	0.48	0.47	0.46	0.45	0.45	0.44
-0.1	1.00	0.90	0.76	0.65	0.59	0.55	0.53	0.51	0.50	0.49	0.49	0.48	0.48
0.0	1.00	0.92	0.78	0.68	0.62	0.58	0.56	0.55	0.54	0.53	0.52	0.52	0.52
0.1	1.00	0.93	0.80	0.70	0.65	0.62	0.59	0.58	0.57	0.57	0.56	0.56	0.56
0.2	1.00	0.94	0.82	0.73	0.68	0.65	0.63	0.62	0.61	0.61	0.60	0.60	0.60
0.3	1.00	0.95	0.84	0.76	0.71	0.69	0.67	0.66	0.65	0.65	0.65	0.64	0.64
0.4	1.00	0.96	0.86	0.79	0.75	0.72	0.71	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69	0.69
0.5	1.00	0.97	0.88	0.82	0.78	0.76	0.75	0.75	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
0.6	1.00	0.98	0.91	0.85	0.82	0.81	0.80	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
0.7	1.00	0.98	0.93	0.89	0.87	0.85	0.85	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
0.8	1.00	0.99	0.95	0.92	0.91	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
0.9	1.00	1.00	0.98	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94
1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

17-3 التصميم اللدن Plastic design

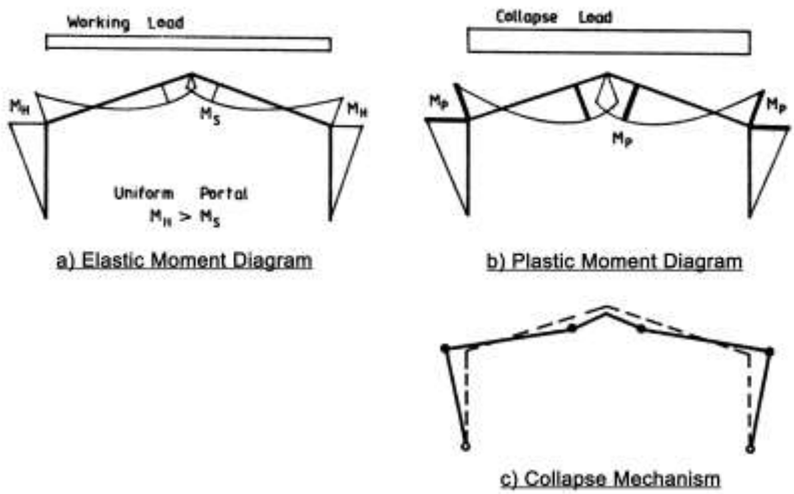
يسمح الكود BS 5950 باستخدام طرق التصميم اللدن في تصميم الجمل الإنشائية على أن تتحقق الشروط التالية:

* أن تكون الأحمال الساكنة هي المسيطرة
* أن يكون للفولاذ المستخدم عتبة سيلان تسمح بتشكيل مفـاصل لدنة ودورانات تكفي لإعادة توزيع العزوم على كامل المنشأ (انظرالشكل 5-2). ولهذا يجب أن لايقل طول عتبة السيلان عن ست مرات التشوه المرن الأعظمي
* أن تكون مقاومة الشد القصوى أكبر بـــ 20% على الأقل من إجهاد السيلان.
* أن تكون المقاطع التي تتشكل فيها المفاصل اللدنة من النوع اللدن، أما بقية مقاطع المنشأ فيجب أن تكون مدمجة على الأقل.
* أن تكون المقاطع متناظرة حول محور متعامد مع محور دوران المفصل اللدن.

* أن يُزوَّد المنشأ بقيود فتل عند المفاصل اللدنة (وإذا لم يكن ذلك ممكناً فيجب أن لايبعد قيد الفتل أكثر من $D/2$ عن المفصل اللدن) وقيود فتل أخرى ضمن مسافات محددة من هذه المفاصل.

17-3-1 التحليل اللدن للإطارات المنتظمة Plastic analysis of uniform frames

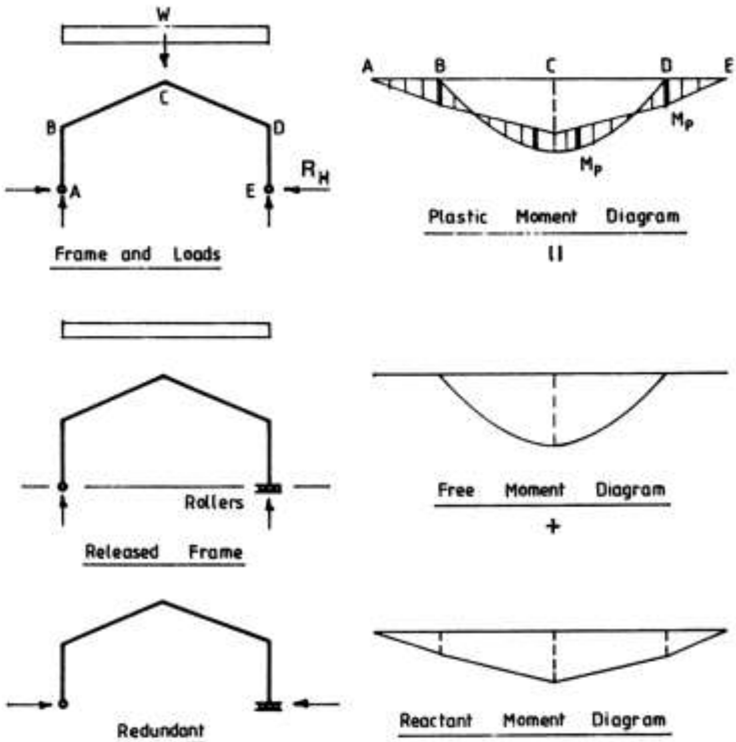
لقد تم شرح أفكار ومبادئ التحليل اللدن في كثير من المراجع ومن أهمها كتاب " Plastic theory of structures " للمؤلف " M.R. Horne ". وسنقوم في هذا الفصل بشرح مبادئ التحليل لإطار متمفصل مع قاعدتيه تحت تأثير الأحمال الشاقولية وسنقدم منحنيات مساعدة لإيجاد توزع العزوم لحالات أخرى.
مع تزايد الأحمال الشاقولية يتشكل مفصل لدن في النقطة التي يصبح فيها العزم المرن أعظمياً (الركبة) كما في الإطار المبيّن في الشكل (17-9) وعندها تحدث دورانات في هذا المفصل ومع زيادة الأحمال يتصرف جائز الإطار وكأنه مسنود استناداً بسيطاً إلى أن يتشكل فيه مفصلان لدنان قرب ذروة الإطار حيث ينهار الجائز، ويبيّن الشكلان (17-9b,c) مخطط عزم الانعطاف اللدن وميكانيكية الانهيار. وبشكل عام فإن عدد المفاصل اللدنة الكافي لتحويل الإطار إلى ميكانيكية انهيار يزيد بواحد على عدد درجات عدم التقرير السكوني، فمثلاً يحتاج الإطار المتمفصل مع قاعدتيه إلى مفصلين لدنين تحت تأثير أحمال غير متناظرة لتشكيل ميكانيكية انهيار. وفي كل الأحوال يجب أن لاتزيد قيمة العزم في أي موقع في المنشأ عن قيمة العزم اللدن وتعتمد ميكانيكية الانهيار المتشكّلة على شكل الأحمال التي يتعرض لها المنشأ.



الشكل (17-9)

يتم التحليل اللدن للإطار المتمفصل مع قاعدتيه المبيّن في الشكل (17-10) وفق الخطوات التالية:

* يُحوَّل الإطار إلى مقرر سكونياً وذلك بتحويل أحد مسنديه إلى متدحرج.
* يُرسَم مخطط عزم الانعطاف الحر للإطار المقرر سكونياً تحت تأثير الأحمال الشاقولية.
* يُرسَم مخطط عزم الانعطاف الناتج عن ردّ الفعل الذي تم تحريره (قوة عدم التقرير).
* يُجمَّع مخططا عزم الانعطاف السابقان لينتج مخطط عزم الانعطاف اللدن فيتحول المنشأ أو جزءاً منه إلى ميكانيكية انهيار مشتملةً العدد الكافي من المفاصل اللدنة.



الشكل (17-10)

يُحدَّد موقع المفصل اللدن في الجائز قرب الذروة إما بالتقريب المتتالي أو رياضياً إذا كان الحمل موزّعاً بانتظام. وعليه يُحدَّد موقع المفصل X من الإطار المبيّن في الشكل (17-11a) بالعلاقة التالية:

$$g = h_1 + (2\,h_2/L)\,x \qquad (17\text{-}15)$$

ويُحدَّد عزم الانعطاف الحر عند المفصل X بالعلاقة التالية:

$$M_x = w\,L\,x/2 - w\,x^2/2 \qquad (17\text{-}16)$$

ويُحدَّد العزم اللدن عند المفصلين B ، X بالعلاقة التالية:

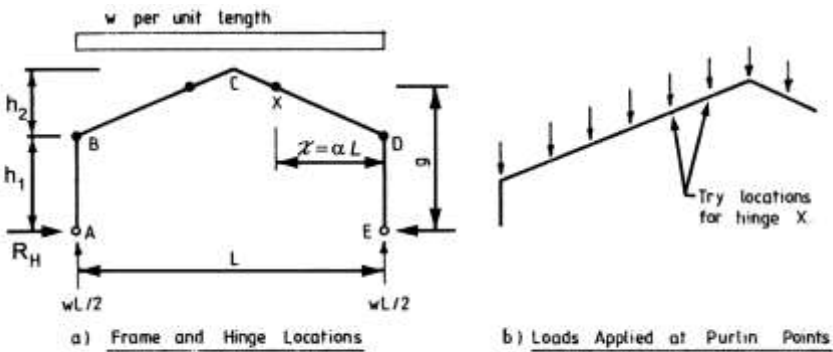
$$M_p = R_H\,h_1 = M_x - R_H\,g \qquad (17\text{-}17)$$

لتحديد R_H و M_p نضع $dR_H / dx = 0$ ونحدد x ونعوضه في العلاقة (17-17) فينتج:

$$M_p = \frac{W_r L}{8} \frac{1}{(1+k/2)+(1+k)^{1/2}} \qquad (17\text{-}18)$$

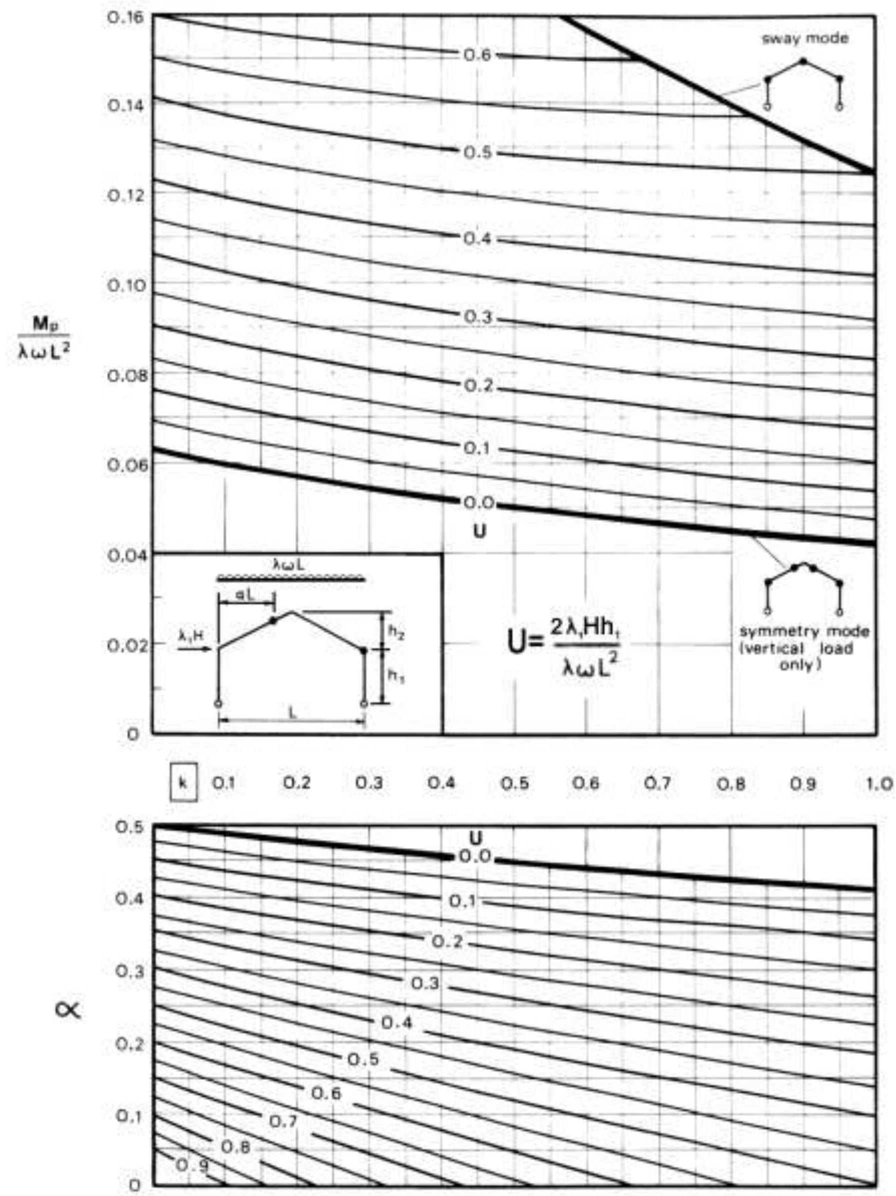
$$W_r = (1.4 w_d + 1.6 w_i) L \qquad (17\text{-}19)$$

حيث: $k = h_2 / h_1$ ، w_d , w_i موزعة على المسقط الأفق.

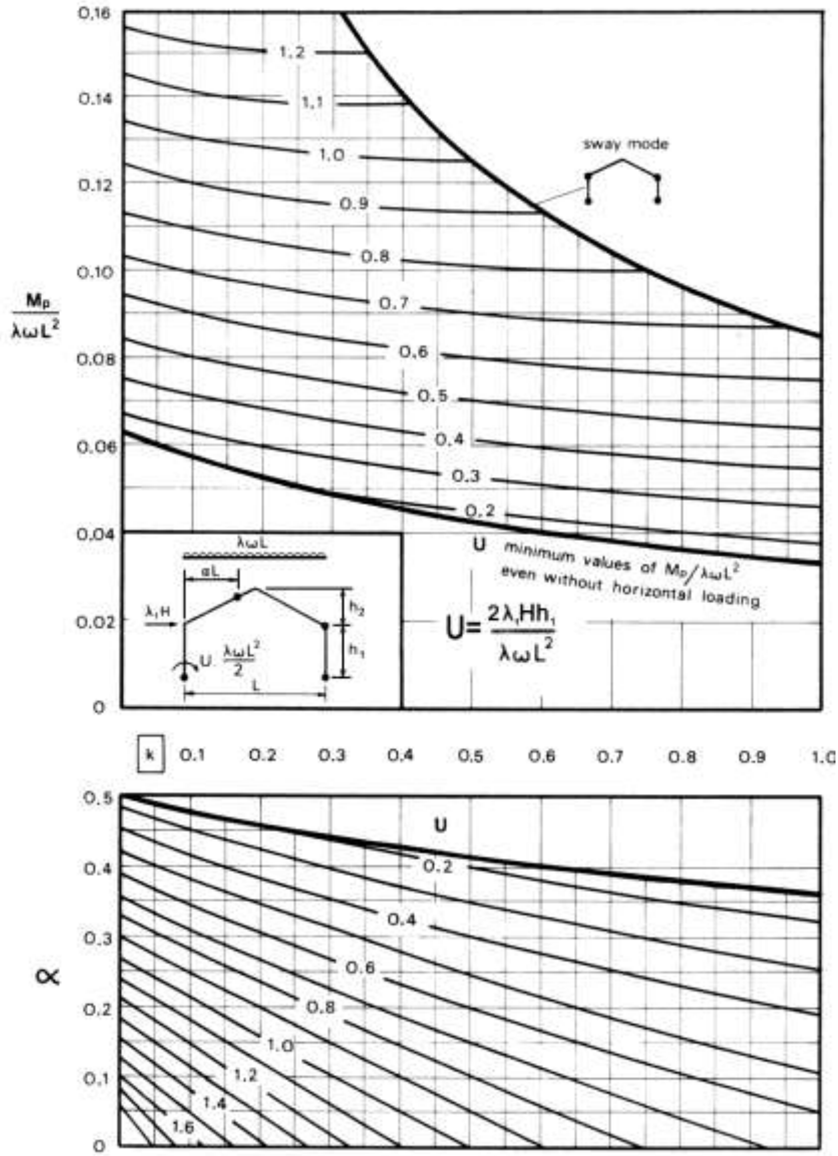


الشكل (17-11)

إذا اعتبرت أحمال الجائز مركّزة في نقاط استناد الجوائز الثانوية كما في الشكل (17-11b) فيتم تشكّل المفصل اللدن في الجائز تحت أحد الجوائز الثانوية القريبة من الذروة وعندها يُحدَّد موقع المفصل اللدن في المقطع الذي يحصل عنده أكبر عزم لدن M_p . ويبيّن الشكلين (17-12,13) ميكانيكيات الانهيار ومواقع المفاصل اللدنة في حالتي الإطار المتمفصل والموثوق مع قاعدتيي تحت أحمال شاقولية موزّعة بانتظام وأفقية مركّزة في الركبة.



الشكل (17-12) المنحني التصميمي للإطار المتمفصل مع قاعدتيه



الشكل (13-17) المنحني التصميمي للإطار الموثوق مع قاعدتيه

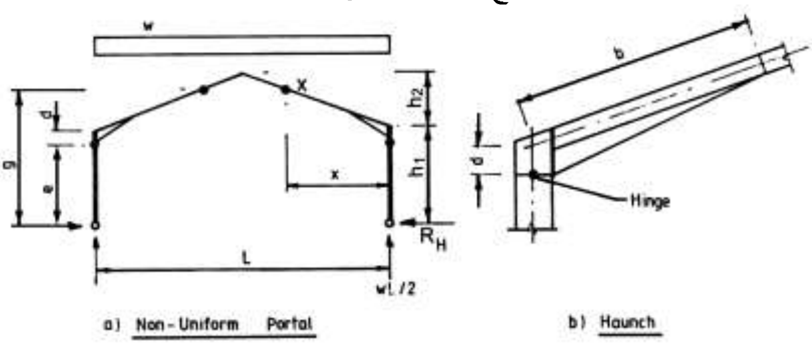
17-3-2 التحليل اللدن للإطارات غير المنتظمة والإطارات ذات الأكتاف
Plastic analysis of hunched and nonuniform frames

كما بينّا سابقاً تُزوَّد الإطارات بأكتاف (شطفات) عند نقطة اتصال الجائز مع العمود وعند ذروة الإطار بغية زيادة ذراع القوى في براغي الوصل. وتتسبب إضافة الكتف في منطقة الركبة بإبعاد المفصل اللدن عن الركبة وتشكّله في أسفل الكتف وبالتالي تخفيض قيمة العزم اللدن، بينما لاتؤثر إضافة الشطفة في ذروة الإطار على قيمة العزم اللدن لأن المفصل اللدن يتشكّل بعيداً عن الذروة، انظر الشكل (17-14). ومن الضروري التأكد من بقاء مقطع الجائز عند نهاية الشطفة في منطقة الركبة مرناً أي أن لايتجاوز الإجهاد المطبّق على المقطع مقاومته التصميمية أي:

$$F/A + M/Z \; < \; p_y \qquad (17\text{-}20)$$

حيث : $M\,,F$ القوة المحورية والعزم المطبّقين على المقطع.

$Z\,,A$ مساحة المقطع ومعامله المرن.



الشكل (17-14)

إن خطوات التحليل اللدن لإطار متمفصل مع قاعدتيه ومقطع جائزه أخفّ من مقطع عاموده ومزود بأكتاف هي ذات الخطوات المتّبعة في الفقرة (17-3-1) مع إضافة العلاقتين التاليتين بدلاً من العلاقة (17-17)

$$M_{pc} = R_H\, e \qquad (17\text{-}21)$$

$$M_{pb} = q\, M_{pc} = M_x - R_H\, g = q\, R_H\, e \qquad (17\text{-}22)$$

حيث:

M_x , g يُحدَّدان بالعلاقتين (17-15) و (17-16)

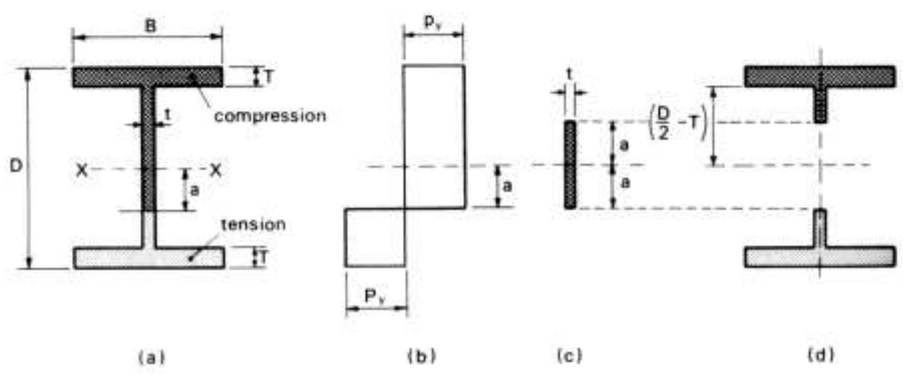
M_{pb} , M_{pc} العزم اللدن الذي يتحمّله مقطع العمود ومقطع الجائز على الترتيب.

q معامل بين 0.7 – 0.6

لتحديد R_H و M_{pb} , M_{pc} نضع $dR_H / dx = 0$ ونحدد x ونعوضه في العلاقتين (17-21,22).

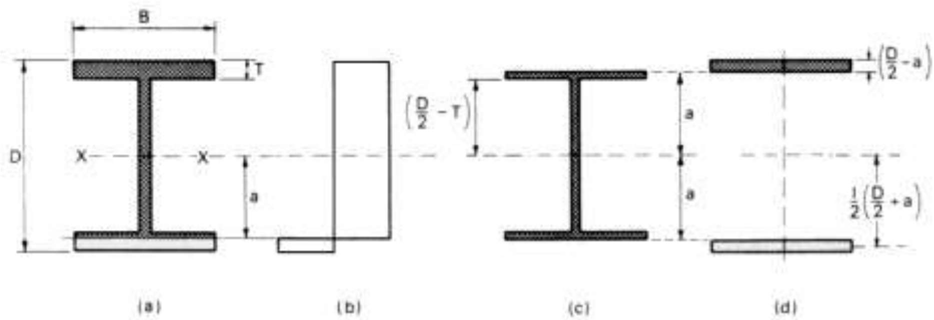
17-3-3 تصميم المقاطع Section design

تُخفض القوة المحورية المطبّقة العزمَ المقاوم اللدن للمقطع، فلو درسنا مقطعاً متناظراً على شكل I كالمبيّن في الشكل (17-15) فإن العزم المقاوم اللدن للمقطع ينخفض من M_{px} إلى M_{prx} عندما يتعرض إلى قوة محورية F ويتحرك المحور السليم إلى الأسفل مبتعداً عن مركز ثقل المقطع.



الشكل (17-15)

عندما تكون F صغيرة يقع المحور السليم في الجسد كما في الشكل (17-15b) ولكن عندما تكون F كبيرة فإن المحور السليم يقع في الجناح كما في الشكل (17-16b).



الشكل (17-16)

لإيجاد العلاقة بين القوة المحورية F والعزم المقاوم اللدن للمقطع M_{prx} يُقسَم المقطع العرضي إلى منطقة مركزية مبيّنة في الشكلين (17-15c) و (17-16c) تخضع إلى إجهادات ضاغطة وإلى منطقتين أخريين متناظرتين خارج المنطقة المركزية مبيّنتين في الشكلين (17-16d) و (17-15d) تخضع إحداهما إلى إجهادات ضغط والأخرى إلى إجهاد شدّ. يمكن النظر إلى المنطقة المركزية على أنها تقاوم القوة المحورية F وإلى المنطقتين الخارجيتين على أنهما تقاومان العزم M_{prx} وبناءً على ذلك يمكن كتابة العلاقتين التاليتين عندما تكون F صغيرة:

$$F = 2\,a\,t\,p_y \qquad (17\text{-}23)$$

$$M_{prx} = M_{px} - t\,a^2\,p_y \qquad (17\text{-}24)$$

مع ملاحظة أن الرموز المستخدمة في هاتين العلاقتين مبيّنة على الشكل (17-15).

فإذا كانت طاقة تحمّل المقطع للقوى المحورية $P_p = A\,p_y$ دون حصول تحنيب

وعرّفنا النسبة بين القوة المطبّقة وطاقة التحمّل $n = F/P_p$ يمكننا تحديد المنطقة المركزية من العلاقة (17-23) كما يلي:

$$a = n\,A/(2t) \qquad (17\text{-}25)$$

نعوض هذه العلاقة في العلاقة (17-24) فنجد:

$$M_{prx} = S_{rx}\; p_y \qquad (17\text{-}26)$$

$$S_{rx} = S_x - (A^2/4\,t)\; n^2 \qquad (17\text{-}27)$$

تبقى العلاقة (17-27) صحيحة مادام المحور السليم ماراً من جسد المقطع أي:

$$a \le D/2 - T \qquad (17\text{-}28)$$

نعوض (17-25) في هذه العلاقة فينتج:

$$n \le n_1 = (D - 2\,T)\; t / A \qquad (17\text{-}29)$$

أما عندما تكون F كبيرة يقع المحور السليم في جناح المقطع وعندها تُحدَّد F و M_{prx} بالعلاقتين التاليتين:

$$F = \left[\, A - 2\,(D/2 - a)\,B \,\right] p_y \qquad (17\text{-}30)$$

$$M_{prx} = \left\lfloor (D/2 - a)\,B\,p_y \right\rfloor (\,D/2 + a) \qquad (17\text{-}31)$$

بتعويض النسبة $n = F/P_b$ في العلاقة (17-30) نجد:

$$a = 0.5\left[\, D - (1 - n)\; A/B \right] \qquad (17\text{-}32)$$

نعوض هذه العلاقة في العلاقة (17-31) فينتج:

$$M_{prx} = S_{rx}\; p_y \qquad (17\text{-}33)$$

$$S_{rx} = \frac{A^2}{4\,B}\;(1 - n)\;\left(\frac{2\,BD}{A} - 1 + n\right) \qquad (17\text{-}34)$$

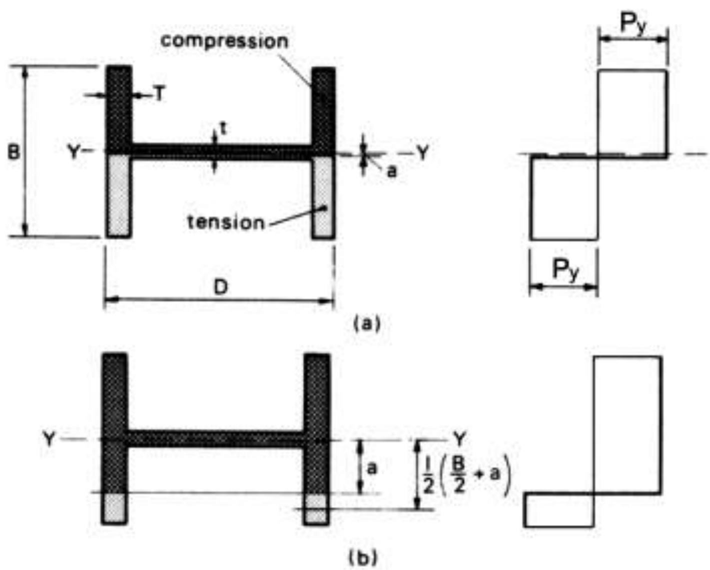
بذات الطريقة يمكن إيجاد العزم المقاوم اللدن لمقطع I حول محوره الضعيف $(y-y)$، انظر الشكل (17-17). فإذا وقع المحور السليم في جسد المقطع فإن:

$$F = 2\,a\,D\ p_y \qquad (17\text{-}35)$$

$$a = n\,A/2\,D \qquad (17\text{-}36)$$

$$M_{pry} = S_{ry}\ p_y \qquad (17\text{-}37)$$

$$S_{ry} = S_y - (A^2/4\ D)\ n^2 \qquad (17\text{-}38)$$



الشكل (17-17)

تبقى العلاقة (17-38) صحيحة مادام المحور السليم مارّا في جسد المقطع أي:

$$a \le t/2 \ \Rightarrow\ n \le n_2 = D\,t/A \qquad (17\text{-}39)$$

أما إذا وقع المحور السليم خارج جسد المقطع فإن:

$$F = \left[\,A - 4\,T\,(\,B/2 - a\,)\,\right] p_y \qquad (17\text{-}40)$$

$$a = 0.5\left[B - (1 - n) A / 2T \right] \qquad (17\text{-}41)$$

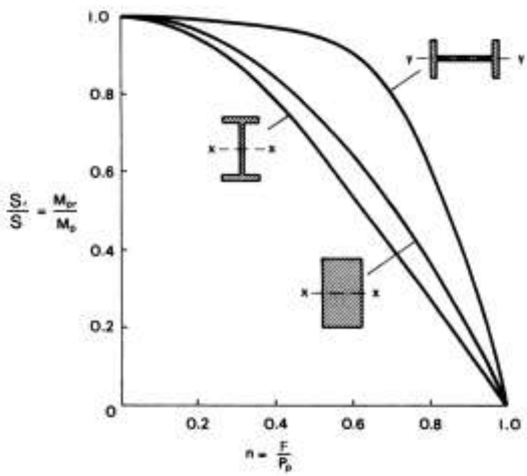
$$M_{pry} = S_{ry}\ p_y \qquad (17\text{-}42)$$

$$S_{ry} = \frac{A^2}{8T}\ (1-n)\ (\frac{4TB}{A}\ -1+n) \qquad (17\text{-}43)$$

بذات الطريقة من السهل أن نبيّن أنه من أجل مقطع مستطيل فإن معامل المقطع اللدن المخفّض يعطى بالعلاقة التالية:

$$S_r = S\ \ (1-n^2) \qquad (17\text{-}44)$$

يبيّن الشكل (17-18) تغيير S_r بدلالة n للمقاطع المستطيلة وللمقاطع على شكل I



الشكل (17-18)

تُحدَّد جداول الشركات المصنّعة للمقاطع القياسية كل من n_1 و n_2 وكذلك S_{rx} و S_{ry} بدلالة n ويمكن استخدام العلاقات المبسّطة التالية:

$$S_r = \overline{\alpha}\ S \qquad (17\text{-}45)$$

التي لاتبعد أكثر من 2% من القيم المدونة في جداول الشركات المصنّعة حيث تُحدَّد $\overline{\alpha}$ من الجدول التالي:

الجدول 2-17				
نوع المقطع	الانعطاف حول المحور $x-x$		الانعطاف حول المحور $y-y$	
قياسي UB (I)	$0 \le n \le 0.1$ $\overline{\alpha} = 1$	$0.1 < n \le 1$ $\overline{\alpha} = 0.27\,(1-n)\,(4+n)$	$0 \le n \le 0.3$ $\overline{\alpha} = 1$	$0.3 < n \le 1$ $\overline{\alpha} = 2.04\,(1-n)\,(0.4+n)$
قياسي UC (H)	$0 \le n \le 0.1$ $\overline{\alpha} = 1$	$0.1 < n \le 1$ $\overline{\alpha} = 0.156\,(1-n)\,(7+n)$	$0 \le n \le 0.2$ $\overline{\alpha} = 1$	$0.2 < n \le 1$ $\overline{\alpha} = 1.56\,(1-n)\,(0.6+n)$

17-3-4 الاستقرار الجانبي Sway stability

في حال غياب تحليل دقيق لاستقرار الإطار يجب أن لايزيد الانتقال الأفقي الناجم عن القوى الاسمية المحددة في الفقرة (2-1-1) في أعلى العمود عن $h/1000$ حيث h ارتفاع العمود، على أن يحسب هذا الانتقال وفقاً لمبادئ التحليل المرن.

ويمكن تحقيق هذا الشرط إذا تحققت العلاقة التالية:

$$\frac{L_b}{D} \le \frac{44}{\Omega}\ \frac{L}{h}\left(\frac{\rho}{4+\rho\,L_r/L}\right)\left(\frac{275}{p_{yb}}\right) \qquad (17\text{-}46)$$

حيث: $L_r = L/\cos\theta \quad , \quad \Omega = W_r/W_o \quad , \quad \rho = (2\,I_c/I_r)\ (L/h)$

p_{yb} المقاومة التصميمية لجائز الإطار.

L مجاز الإطار، h ارتفاع عمود الإطار، D أصغر ارتفاع لمقطع جائز الإطار.

L_b المجاز الفعال ويساوي L إلا إذا كان ارتفاع الشطفة عند الركبة أكبر أو يساوي $2D$ (انظر الشكل 17-19) فيؤخذ $L_b = L - L_h$ حيث L_h هو طول الشطفة وإذا كان طول الشطفتين عند طرفي الإطار غير متساوي فيُحدَّد الطول L_h كمتوسط طول الشطفتين.

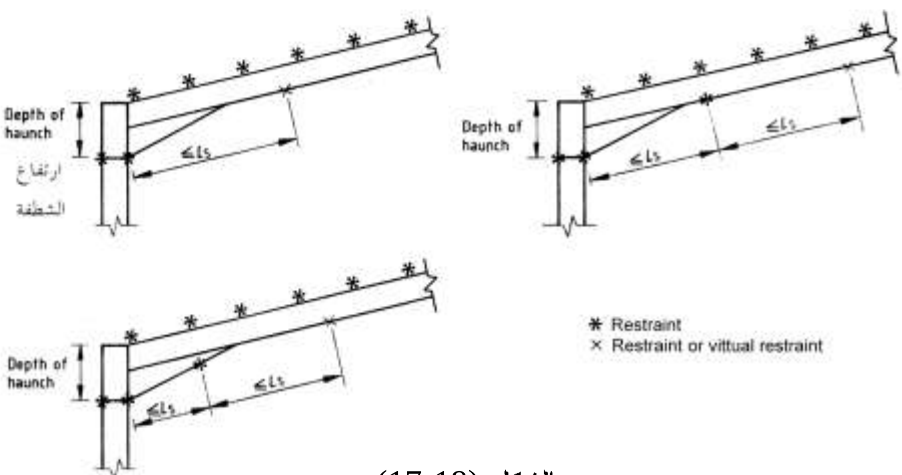
I_c عزم عطالة أصغر مقطع للعمود يقاوم الانعطاف في مستوي الإطار ويؤخذ مساوياً الصفر إذا لم يكن اتصال العمود بالجائز صلباً.

I_r عزم عطالة أصغر مقطع للجائز يقاوم الانعطاف في مستوي الإطار.

W_r مجموع الأحمال الشاقولية المصعّدة المطبّقة على جائز الإطار ويُحدَّد وفقاً للعلاقة (17-19).

W_o القيمة العظمى للأحمال الشاقولية التي تسبب انهياراً لدناً لجائز الإطار باعتبار مجازه L وموثوق عند طرفيه ويساوي $16M_{pb}/L$.

L_r الطول الفعال الكلي لجائز الإطار ، θ زاوية ميل جائز الإطار على الأفق.



الشكل (17-19)

17-3-5 القيود واستقرار العناصر Restraints and member stability

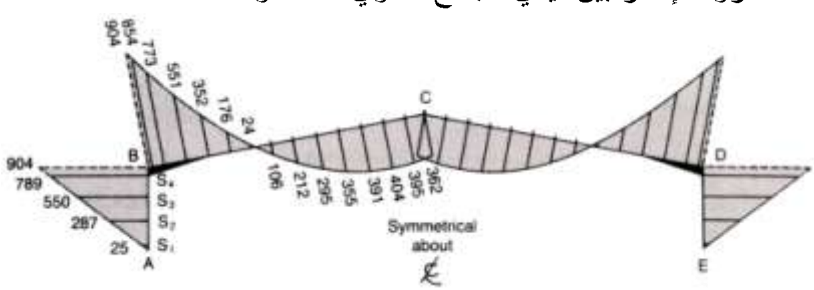
عند استخدام طرائق التصميم اللدن تتغير إلى حد ما الاشتراطات المفروضة لضمان استقرار العناصر حيث لم يعد كافياً التأكد من تحمّل العناصر للعزم وقوة الضغط المحورية المطبقين بأمان بل يجب أن تكون العناصر قادرة على تحمّل العزم المطلوب بوجود قوة الضغط مع حدوث دورانات كبيرة كافية لحدوث ميكانيكية انهيار في الإطار. وعليه يجب تزويد عناصر الإطار بقيود لضمان مايلي:

* إمكانية تشكّل مفاصل لدنة في المقاطع العميقة ذات الشكل I. فعدم تشكّل المفاصل اللدنة سيمنع تشكّل ميكانيكية الانهيار التي هي أساس التصميم.
* عدم حصول تحنيب كلي لعمود أو لجائز الإطار حول المحور الضعيف.
* عدم حصول تحنيب فتل جانبي للجناح المضغوط عندما يكون غير مقيد.

يبين الشكل (17-20) مخططاً نموذجياً لعزوم انهيار إطار متمفصل مع قاعدتيه تحدث تأثير الأحمال الشاقولية (ميتة + حية) ولقد تم اعتبار العمود أثقل من الجائز وطول الشطفة يساوي 10% من مجاز الإطار وارتفاع المقطع مع الشطفة عند الركبة يساوي ضعف ارتفاع مقطع الجائز. كما تم اعتبار أن الجوائز الثانوية وسكك الجدران تؤمّن مساند جانبية للجناح الخارجي للجائز والعمود.

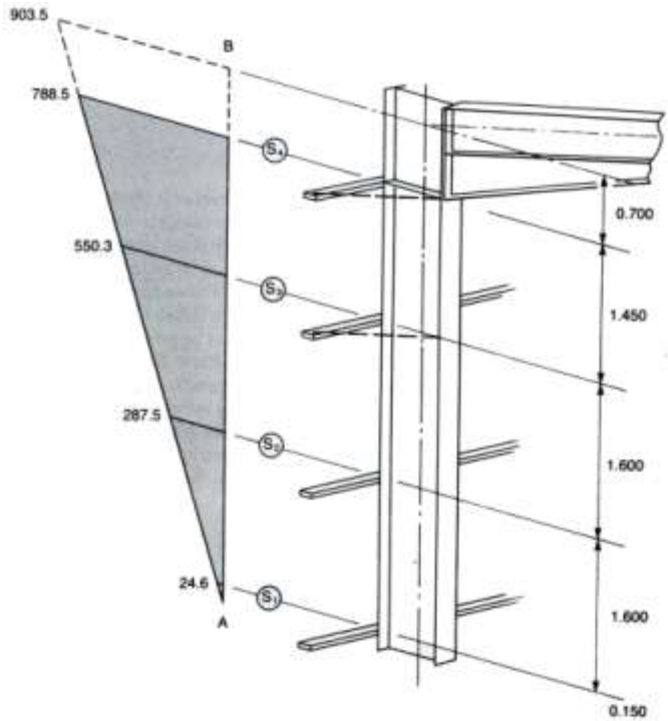
يمكن تمييز أربع مناطق في الإطار يجب تأمين استقرارها وهي:

- ارتفاع العمود الكامل AB .
- منطقة الشطفة حيث يجب أن تبقى مرنة على كامل طولها.
- الجائز عند نهاية الشطفة حيث الجناح السفلي غير مقيّد ويخضع لضغط نتيجة العزم.
- منطقة ذروة الإطار بين قيدي الجناح العلوي المضغوط.



الشكل (17-20)

كما يبين الشكل (17-21) مخططاً توضيحياً للعمود AB مبيناً عليه التدعيم المؤمّن بواسطة سكك الجدران إضافة للعزم المطبّق على طول العمود.



الشكل (17-21)

كما بيّنا سابقاً أن الاستقرار يجب أن يبقى مؤمّناً إلى أن يتحول المنشأ إلى ميكانيكية انهيار، وباعتبار أنه سيتشكّل مفصل لدن في العمود عند أسفل الشطفة لذلك يشترط الكود BS 5950 تأمين قيد فتل للعمود ضمن مسافة لاتزيد عن *D/2* من موقع المفصل، حيث D ارتفاع مقطع العمود. يمكن تأمين هذا القيد بشكل سهل عن طريق سكة الجدار كما في الشكل (17-4). كما يجب تأمين استقرار جزء العمود المجاور للمفصل اللدن وذلك بتنفيذ قيد فتل ثاني (عند السكة S_3 مثلاً في الشكل 17-21) يبعد مسافة L_m من قيد الفتل الأول وتُحدَّد هذه المسافة وفق إحدى الحالتين التاليتين:

* عندما لاتؤخذ قيود الجناح المشدود بالحسبان

$$L_m = \frac{38\, r_y}{\left[\left(f_c/130\right) + \left(p_y/275\right)^2 \left(x/36\right)^2\right]^{1/2}} \qquad (17\text{-}47)$$

حيث:

f_c إجهادات الضغط الناجمة عن القوة المحورية.

r_y نصف قطر عطالة المقطع حول المحور الضعيف وعندما يكون للمقطع جناحين غير متساويين تؤخذ r_y إما للمقطع ككل أو للجناح المضغوط أيهما أصغر.

x مؤشر الفتل.

عندما يكون العنصر متغير العطالة ضمن الطول L_m تؤخذ القيمة الصغرى لـــ r_y والقيمة العظمى لـــ x.

* عند أخذ قيود الجناح المشدود بالحسبان.

تُطبَّق العلاقتين (17-48,49) مع أخذ النسبة K بين ارتفاع الشطفة وارتفاع مقطع الجائز مساوية واحد.

بعد إضافة قيود الفتل للعمود يُحدَّد طول العمود الفعّال حول المحور القوي كما جاء في الفقرة (17-2-1) أو يُحدَّد بالمسافة بين المفصل اللدن وقاعدة العمود كما جاء في بعض المراجع الأخرى. ويُحدَّد الطول الفعّال حول المحور الضعيف بالمسافة بين قيدي الفتل S_3 و S_4 كما في الشكل (17-21) أو بالمسافة بين قيد الفتل S_3 وقاعدة العمود.

بشكل مشابه يتم تأمين استقرار الجائز في منطقة الركبة إما بعدم أخذ قيود الجناح المشدود بالحسبان وتُحدَّد عندها المسافة L_s من الركبة إلى أول قيد للجناح المضغوط (انظر الشكل 19 -17) بتطبيق العلاقة (17-47) أو بأخذ قيود الجناح المشدود بالحسبان كما في الشكل (17-22) فتُحدَّد المسافة المذكور L_s بالعلاقتين التاليتين:

* للفولاذ ماركة $Gr\ 43$

$$L_s = \frac{K_1\, r_y\, x}{\left(72\, x^2 - 10^4\right)^{1/2}} \qquad (17\text{-}48)$$

* للفولاذ ماركة $Gr\ 50$

$$L_s = \frac{K_2\, r_y\, x}{\left(94\, x^2 - 10^4\right)^{1/2}} \qquad (17\text{-}49)$$

حيث : $r_y\ ,\ x$ كما تم تعريفهما في العلاقة (17-47) ويُحدَّد المعاملان K_1 و K_2 من الجدول التالي:

الجدول (17-3)		
نسبة ارتفـــاع الشــطفة إلى ارتفاع مقطع الجائز	K_1	K_2
1	620	645
2	495	515
3	445	465

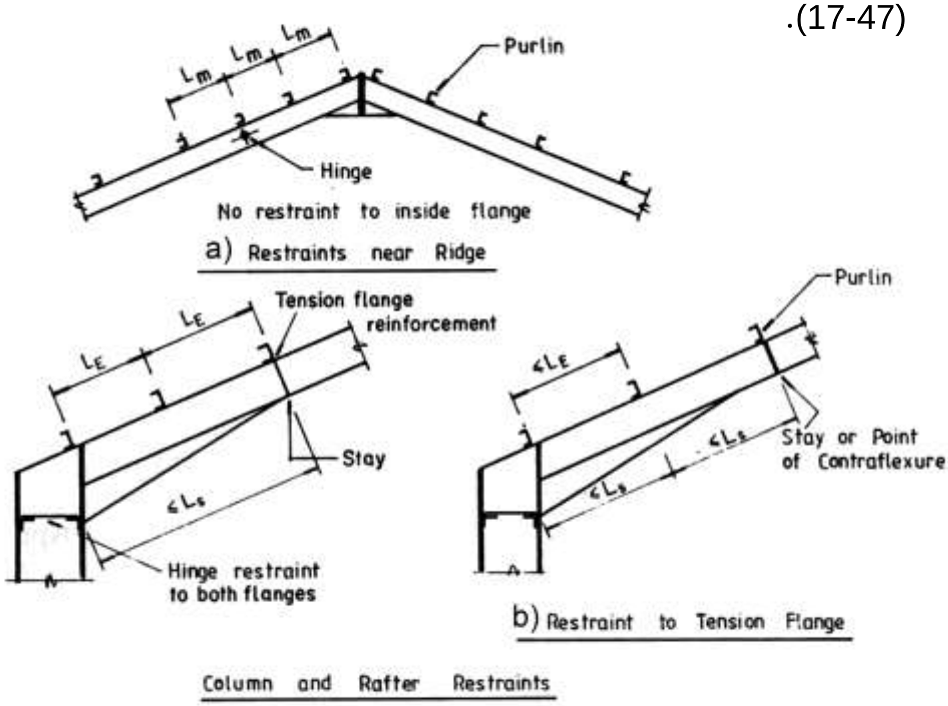
يجب الانتباه إلى أن تطبيق العلاقتين (17-48,49) يخضع للشروط التالية:

- أن يكون المقطع قياسي UB.
- لايزيد ارتفاع الشطفة على ثلاث مرات ارتفاع الجائز.
- لايقل عرض جناح الشطفة عن عرض جناح الجائز.

وبشكل عام يُعتبَر تأمين قيد فتل عند رأس الشطفة عملاً جيداً لأن حامل قوى الضغط في الجناح السفلي يتغير في هذا الموقع.

لا حاجة لتأمين قيد فتل لتأمين استقرار جائزالإطارعند المفصل اللدن قرب الذروة لأن الجناح المشدود يقع في الأسفل ولكن يجب تأمين جائز ثانوي عند أو قرب المفصل اللدن وتأمين جائزيين ثانويين لسند الجناح المضغوط يبعد كل منهما مسافة

لا تزيد عن L_m من المفصل كما في الشكل (17-22) حيث تحدد L_m بالعلاقة (17-47).



الشكل (17-22)

17-3-6 تصميم وصلة الركبة Design of eaves joint

يبين الشكل (17-23) شكلاً من أشكال وصلة الركبة، ونبين فيمايلي خطوات تصميم هذه الوصلة:

* حساب القوى في الوصلة:

بأخذ عزوم القوى المطبّقة على الوصلة عند النقطة X نجد قوة الشد T في صفي البراغي العلويين.

$$V\,d/2 - M_{pc} + Ta = 0 \;\Rightarrow\; T = (M_{pc} - V\,d/2)/a \qquad (17\text{-}50)$$

* تُحدَّد قوة الضغط C التي يؤثر بها جناح الشطفة السفلي على الوصلة بالإسقاط على محور أفقي.

$$C = T + H \qquad (17\text{-}51)$$

* ومنه تُحدَّد قوة الضغط في جناح الشطفة.

$$F = C / \cos\phi \qquad (17\text{-}52)$$

* حساب القوى في البراغي

تحتوي الوصلة المبينة في الشكل على أربعة صفوف من البراغي وكل صف يحتوي على برغيين وعليه تُحدَّد قوة الشد وقوة القص في البرغي الواحد كمايلي:

$$F_t = T/4 \quad , \quad F_s = V/8 \qquad (17\text{-}53a,b)$$

* تحقيق صفيحة نهاية الشطفة وجناح العمود

يبين الشكل (17-23b) أشكال خطوط الانهيار في أحد ألواح صفيحة النهاية أو جناح العمود.

يُحدَّد العمل W_e الذي تقوم به قوة الشد في البرغي بالعلاقة التالية:

$$W_e = T\,\theta\, b / 8 \qquad (17\text{-}54)$$

ويُحدَّد العمل W_i الذي تقوم بها العزوم عند خطوط الانكسار.

$$W_i = 4m\theta(c+e) - mv\theta(1+\cos\phi) + (mb/c)(b - 0.5v\sin\phi)\theta \qquad (17\text{-}55)$$

بمساواة معادلتي العمل السابقتين تنتج قيمة العزم اللدن m في واحدة الطول. مع العلم أن كافة الرموز مبينة على الشكل (17-33). وتُحدَّد السماكة الدنيا لصفيحة النهاية أو لجناح العمود بتطبيق العلاقة (5-2) فينتج:

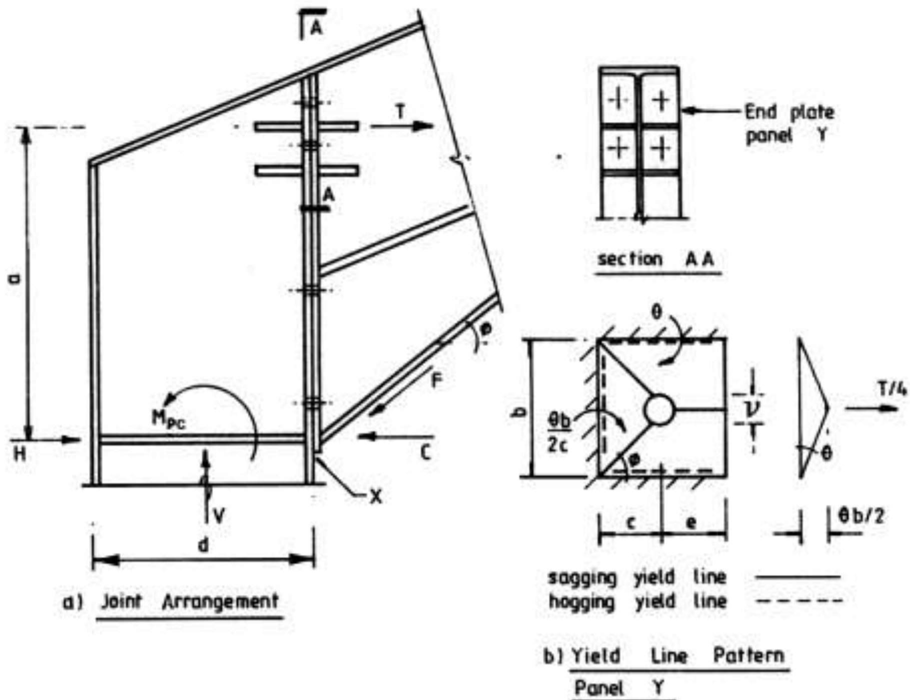
$$t = (4m / p_y)^{1/2} \qquad (17\text{-}56)$$

* كما يجب تحقيق مايلي:

– جناح الشطفة $F \le p_y$ x (مساحة جناح الشطفة)

– مدعّمة العمود عند أسفل الشطفة لتتحمل القوة C

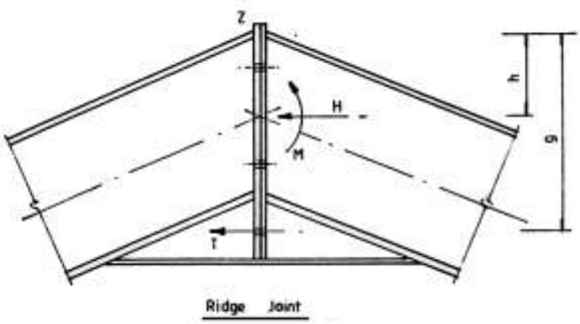
- جسد العمود وجسد الجائز تحت تأثير القوة T واعتبار المدعّمات الصغيرة عند توزيع القوة.
- اللحام بين صفيحة النهاية والجائز وكذلك اللحام حول كل المدعّمات.



الشكل (17-23)

17-3-7 تصميم وصلة الذروة Design of ridge joint

يبين الشكل (17-24) شكلاً من أشكال وصلة الذروة.



الشكل (17-24)

* تحسب القوة T في صف البراغي السفلي بكتابة معادلة توازن العزوم حول Z فينتج:

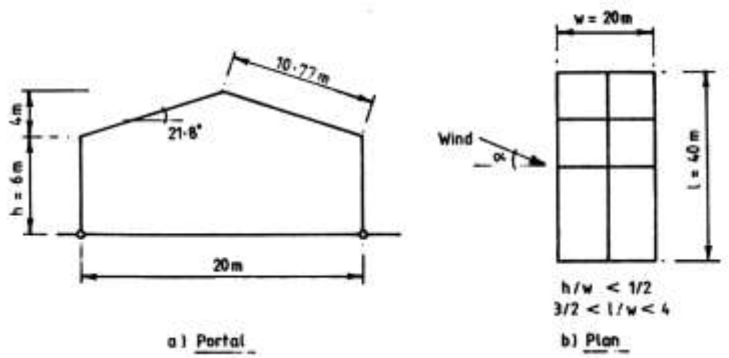
$$T = (M - Hh) / g \qquad (17\text{-}57)$$

حيث : M و H العزم والقوة الأفقية عند الذروة وبقية الرموز موضّحة على الشكل (17-24).

تُدرَس تحقيقات الوصلة كما في وصلة الركبة.

مثـــال (17-1)

سيتم إشادة مبنى صناعي فولاذي من طابق واحد بمساحة 40×20 وبارتفاع صافي قدره 6m في مدينة صغيرة سرعة الرياح الأساسية فيها 45 m/s. تم اختيار الجملة الإنشائية للبناء من إطارات بابية كما هو مبين في الشكل أدناه، يبعد أحدها عن الآخر 5m . صمّم الإطار الرئيسي بالطريقة المرنة من فولاذ $Gr\ 43$



أولاً : اعتبارات تصميمية

* يُقدَّر الوزن الذاتي لطبقات التغطية مع العزل الحراري بـــ $0.25\ kN/m^2$
* تم استخدام جوائز ثانوية وسكك جدران زنة $0.04\ kN/m$ وبتباعد بينها قدره $1.5\,m$ فكان وزنها الذاتي $0.03\ kN/m^2$.
* بفرض استخدام مقطع قياسي $457 \times 191 \times 67\,UB$ فيكون وزنه الذاتي $0.13\ kN/m^2$.
* يُقدَّر الحمل الحي بـــ $0.75\ kN/m^2$ لأن السقف لايوصل إليه وزاوية ميله أقل من 30°.
* زاوية ميل السقف $\theta = 21.8^\circ$.

الفقرة (1-1-2)

ثانياً : تقدير أحمال الإطار

- الأحمال الميتة على السقف: (موزعة على المسقط الأفقي)

$$w_d = (0.25+0.03+0.13)\ x\,5\ x\,10.77/10 = 2.21\,kN/m$$

- الأحمال الميتة لجدار البناء:

$$w_{d1} = (0.25+0.03+0.13)\ x\,5\ x\,6 = 12.3\ kN$$

- الأحمال الحية: $w_i = 0.75\,x\,5 = 3.75\,kN/m^2$

- الأحمال المصعّدة على السقف:

$$w' = 1.4\,w_d + 1.6\,w_i = 1.4\,x\,2.21 + 1.6\,x\,3.75 = 9.09\,kN/m$$

- الأحمال الأفقية الافتراضية المطبّقة عند رأس كل عمود:

$$H = 0.5\,x\,0.005\,x\,(9.09\,x\,20) = 0.45\,kN$$

- أحمال الرياح: يُحدَّد معامل الخشونة S_2 من الجدول (2-12) باعتبار أن البناء سيُشاد في مدينة صغيرة (الفئة 3) وأن أي من أبعاد البناء أصغر من $50\,m$ (الصف B) وعليه يُحدَّد معامل الخشونة حسب الارتفاع وعليه تُحدَّد السرعة التصميمية V_s وفق العلاقة (3-12) مع اعتبار $S_1 = S_3 = 1$ ومنه يُحدَّد الضغط الديناميكي q وفق العلاقة (2-12). يبين الجدول التالي هذه المقادير مع معامل الضغط الخارجي c_{pe} وفقاً للجدولين (12-3,4).

العنصر	الارتفاع (m)	S_2	V_s m /sec	q kN/m^2	c_{pe}		
					$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 90^\circ$
					واجهة الرياح wind ward	الوجه الخلفي Lee ward	
سقف	10	0.74	33.3	0.68	- 0.33	- 0.4	- 0.7
جدران	6	0.67	30.2	0.56	+ 0.7	- 0.25	- 0.5

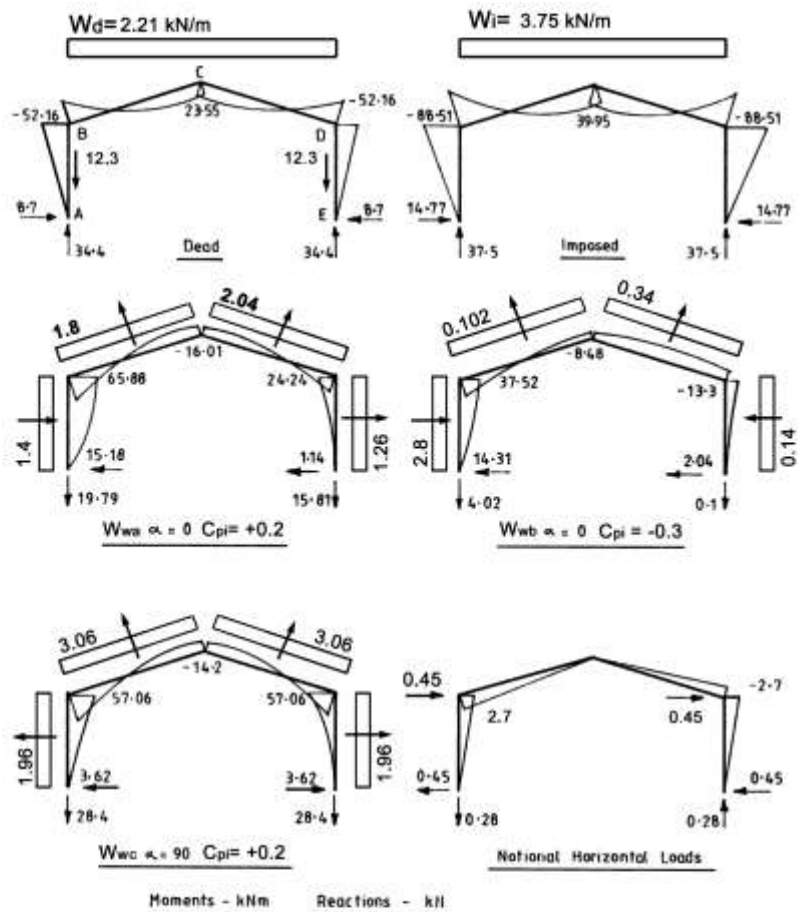
يُحسَب حمل الرياح على الإطار وفق العلاقة التالية:

$w_w = 5q(c_{pe} - c_{pi})$

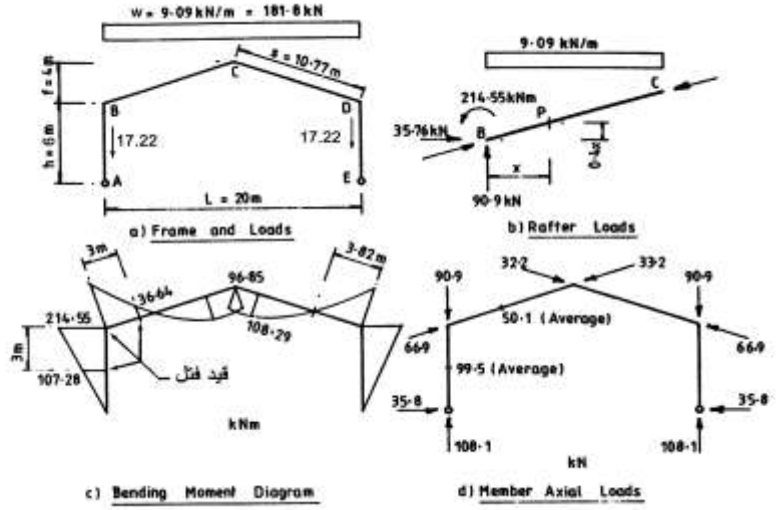
حيث c_{pi} معامل الضغط الداخلي ويأخذ إحدى القيمتين $+0.2$ أو -0.3 كما جاء في الفصل (12) .

ثالثاً : التحليل الإنشائي

تبين المخططات التالية الأحمال غير المصعّدة (عدا الأحمال الأفقية الافتراضية) التي يتعرض لها المنشأ ومخططات عزم الانعطاف الناتجة.



كما يبين الشكل التالي مخططي عزم الانعطاف والقوى المحورية في الإطار نتيجة تطبيق الأحمال الشاقولية المصعّدة.



رابعاً : تصميم العمود:

* حالات التحميل الرئيسية

D		B		النقطة
القوة المحورية kN	العزم kNm	القوة المحورية kN	العزم kNm	حالة التحميل
		90.9	- 214.55	$1.4\ w_d + 1.6\ wi$
91.18	- 217.25			$1.4\ w_d + 1.6\ w_i + H$
		- 5.6	39.1	$1.0\ w_d + 1.4\ w_{wa}$
71.4	- 184.76			$1.2\ (w_d + w_i + w_{wb})$

العزم الذي يشد الألياف الخارجية سالب وقوى الضغط موجبة.

* العزم التصميمي والقوة المحورية التصميمية في النقطة D

$M = 217.25\ kN\,m \quad , \quad F = 91.18\ kN$

(الجدول (2-1)) (الجدول (2-2)) (العلاقة (5-2))

* نختار مقطعاً قياسياً منتظماً $UB\ 457 \times 152 \times 60$ من فولاذ ماركته $Gr\ 43$ لكامل الإطار

$D = 454.6\,mm\ ,\ B = 152.9\,mm\ ,\ d = 407.6\,mm\ , t = 8.1\,mm\ , T = 13.3\,mm$

$b/T = 5.75\ ,\ d/t = 50.3\ ,\ Z_x = 1122\ cm^3\ ,\ S_x = 1287\ cm^3\ , A = 76.2\ cm^2$

$r_x = 18.3\ cm\ ,\ r_y = 3.23\ cm$

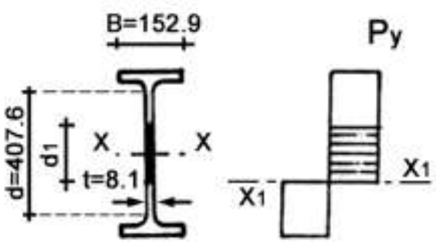
الجدول (2-1)

– $T = 13.3\ mm < 16 \Rightarrow p_y = 275\ N/mm^2\ ,\ \varepsilon = (275/p_y)^{1/2} = 1.0$

– تصنيف المقطع

$b/T = 5.75 < 8.5\,\varepsilon \Rightarrow$ الجناح لدن

يُحدَّد طول جزء الجسد الذي يتحمل قوة الضغط المحورية التصميمية كما يلي:



$d_1 t\, p_y = F \Rightarrow d_1 = \dfrac{91.18 \times 10^3}{8.1 \times 275} = 40.9\,mm$

الجدول (2-2)

$y_c = (d + d_1)/2 = 224.25\,mm \Rightarrow \alpha = 2\,y_c/d = 2 \times 224.25/407.6 = 1.1$

$\dfrac{d}{t} = 50.3 < \dfrac{79\,\varepsilon}{0.4 + 0.6\,\alpha} = \dfrac{79 \times 1}{0.4 + 0.6 \times 1.1} = 74.5 \Rightarrow$ الجناح لدن

إذاً المقطع كله لدن.

* تحقيق طاقة تحمّل العمود ED موضعياً

– نظراً لأن المقطع لدن تُحدَّد طاقة تحمّل العزم حول المحور X كمايلي:

العلاقة (5-2)

$M_{cx} = p_y\,S_x \le 1.2\,p_y\,Z_x$

$M_{cx} = 275 \times 1287 \times 10^{-3} \le 1.2 \times 275 \times 1122 \times 10^{-3}$

$M_{cx} = 353.9\,kN\ m \le 370.2\ kN\ m$

$\therefore M_{cx} = 353.9\,kN\ m$

– لتحقيق طاقة تحمّل العمود موضعياً في النقطة D يجب تحقيق علاقة الترابط التالية:

العلاقة (8-1)

$$\frac{F}{A_g\ p_y}+\frac{M_x}{M_{cx}}\le 1 \;\Rightarrow\; \frac{91.18}{76.2 \times 275 \times 10^{-1}}+\frac{217.25}{353.9}=0.66 \;<1 \qquad o.k.$$

* تحقيق التحنيب الكلي

– يحدد الطول الفعّال للعمود في مستوي الإطار (حول المحور x-x) كمايلي:

العلاقة (17-1)

إما $L_{Ecx}/L_c=2.0+0.45(2\times 10.77/6)=3.62$

أو باستخدام الشكل (4-4a)

$$(k_1=\frac{1/6}{1/6+1/21.54}=0.782 \quad , \quad k_2=1) \;\Rightarrow\; L_{Ecx}/L_c=3.5$$

$$\therefore L_{Ecx}=3.62 \times 600=2172\ cm \;\Rightarrow \lambda_x=L_{Ecx}/r_x=2172/18.3=118.7$$

– يُحدَّد الطول الفعّال للعمود خارج مستوي الإطار (حول المحور الضعيف) مع فرض وجود قيد جانبي وفتل في أعلى العمود وفي منتصف ارتفاعه كما هو مبين على مخطط العزوم أعلاه.

$$L_{Ecy}=300cm \;\Rightarrow\; \lambda_y=L_{Ecy}/r_y=300/3.23=92.9$$

– تُحدَّد مقاومة الضغط كما يلي:

الجدول (4-3a)

الجدول (4-3b)

$$\lambda_y=92.9 \;,\; p_y=275\ N/mm^2 \;\Rightarrow\; p_{cy}=154\ N/mm^2$$

$$\therefore p_c=p_{cx}=121\ N/mm^2$$

– يعتمد العزم المقاوم لتحنيب الفتل الجانبي على:

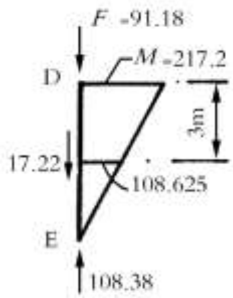
نسبة النحافة حول المحور الضعيف.

$$\lambda = \lambda_y = 92.9$$

ومعامل التحنيب $u = 0.9$

ومؤشر الفتل $x = D/T$

$$= 454.6/13.3 = 34.2$$



مخطط العزم والقوى المحورية

الجدول (5-4)
$$\left.\begin{array}{l}\lambda / x = 2.7 \\ N = 0.5\end{array}\right\} \Rightarrow v = 0.92$$

الجدول (5-9)
$$\beta = 108625/217.25 = 0.5 \Rightarrow m = 0.76$$

الجدول (5-5)
$$n = 1.0$$

العلاقة (5-7)
$$\lambda_{LT} = n\,u\,v\,\lambda = 1.0 \text{ x } 0.9 \text{ x } 0.92 \text{ x } 92.9 = 77$$

الجدول (5-10)
$$\lambda_{LT} = 77 \;,\; p_y = 275 N/mm^2 \quad \Rightarrow \quad p_b = 172 N/mm^2$$

العلاقة (5-6)
$$M_b = p_b\, S_x = 172 \text{x} 1287 \text{x} 10^{-3} = 221.3 \; kN\,m$$

لتحقيق التحنيب الكلي يجب أن تتحقق المتراجحة التالية:

العلاقة (8-2)
$$\frac{F}{A_g\, p_c} + \frac{m\, M_x}{M_b} \leq 1.0$$

$$\frac{91.18}{76.2 \text{ x } 121 \text{ x } 10^{-1}} + \frac{0.76 \text{ x } 217.25 m\, M_x}{221.3} = 0.85 < 1.0 \qquad o.k.$$

إذاً مقطع العمود كافٍ.

خامساً : تحقيق جائز الإطار

* العزم التصميمي والقوة المحورية التصميمية

$M = 217.25\, kNm\ ,\ F = 66.9\, kN$

* المقطع محقق موضعياً عند الركبة لأنه يتعرض لذات العزم وقوة محورية ضاغطة أقل مما يتعرض له العمود.

* تحقيق التحنيب الكلي:

– يُحدَّد الطول الفعّال لنصف مجاز الجائز في مستوي الإطار بتطبيق العلاقة (17-2)

العلاقة (17-2)

$$k_R = \frac{3.62 \text{ x } 2 \text{ x } 6}{21.54}\sqrt{\frac{99.5}{50.1}} = 2.84$$

$$\therefore L_{ERx} = 2.84 \text{x} 10.77 = 30.58 m \Rightarrow \lambda_x = L_{ERx} / r_x = 167 < 180$$

– يُحدَّد الطول الفعّال للجائز خارج مستوي الإطار وذلك باعتبار وجود قيد جانبي وقيد فتل على بعد 3.0 m من الركبة كما هو مبين في مخطط عزم الانعطاف لحالة الأحمال الشاقولية فيتم بذلك تجزيء الجائز إلى قسمين، الأول من الركبة حتى قيد الفتل بطول 3.0 m يخضع فيه الجناح الداخلي وغير المقيد إلى قوى ضغط نتيجة العزم. أما في الجزء الثاني (من قيد الفتل إلى ذروة الإطار) يخضع الجناح الخارجي المقيد بالجوائز الثانوية إلى الضغط الناتج عن العزم. لذلك سيتم تحقيق القسم الأول كونه الأخطر.

$$\therefore L_{ERy} = 300 cm \ \Rightarrow\ \lambda_y = L_{ERy} / r_y = 92.9$$

الجدول (4-3a)

$$(\lambda_x = 167\ ,\ p_y = 275) \ \Rightarrow\ p_{cx} = 65.7\ N/mm^2$$

الجدول (4-3b)

$$(\lambda_y = 92.9\ ,\ p_y = 275) \ \Rightarrow\ p_{cy} = 154\ N/mm^2$$

$$\therefore p_c = p_{cx} = 65.7\ N/mm^2$$

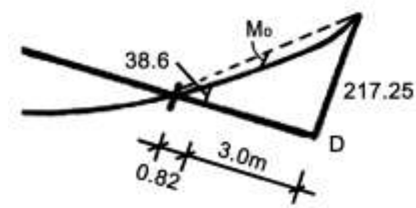
- تحديد العزم المقاوم لتحنيب الفتل الجانبي

$$\lambda = \lambda_y = 92.9\ ,\ u = 0.9\ ,\ x = D/T = 34.2$$

الجدول (5-4)

$$\left.\begin{array}{l}\lambda / x = 2.7 \\ N = 0.5\end{array}\right\} \Rightarrow\ v = 0.92$$

يتعرض هذا الجزء من الجائز إلى العزم الناتج عن الأحمال الشاقولية المصعّدة مضافاً إليه العزم الناتج عن الأحمال الأفقية الافتراضية.



$$M_o = 9.09(3\text{x}10/10.77)^2\ /8 = 8.82 kN\,m$$

الجدول (5-6)

$$\left.\begin{array}{l}\gamma = -217.25\ /8.82 = -24.6 \\ \beta = 38.6\ /217.25 = 0.18\end{array}\right\} \Rightarrow\ n = 0.74$$

العلاقة (5-7)

$$\lambda_{LT} = u\,n\,v\,\lambda = 0.74\text{x}0.9\text{x}0.92\text{x}92.9 = 57$$

الجدول (5-10)

$$(\lambda_{LT} = 57\ ,\ p_y = 275)\ \Rightarrow\ p_b = 221\ N/mm^2$$

اللعلاقة (5-6)

$$M_b = p_b\, S_x = 221\text{x}1287\text{x}10^{-3} = 284.4\ kN\,m$$

الجدول (5-5)

$m = 1.0$ باعتبار الفتحة محمّلة

لتحقيق التحنيب الكلي يجب أن تتحقق علاقة الترابط التالية:

العلاقة (8-2)

$$\frac{F}{A_g\ p_c} + \frac{m\,M_x}{M_b} \le 1.0$$

$$\frac{66.9}{76.2\ \text{x}\ 65.7\ \text{x}\ 10^{-1}} + \frac{1.0\ \text{x}\ 217.25}{284.4} = 0.9\ < 1.0\ \ o.k.$$

إذاً الجائز محقّق.

مثـــال (17-2)

أعد تصميم الإطار الرئيسي في المثال (17-1) باستخدام طرائق التصميم اللدن.

الحـــــل:

أولاً : اعتبارات تصميمية

- يزود الإطار بشطفة عند الركبة طولها 1.5m وارتفاعها 0.45m
- العزم اللدن للعمود M_{pc} وللجائز $M_{pb}=0.75M_{pc}$

ثانياً : التحليل الإنشائي

* تحت تأثير الأحمال الشاقولية $(1.4\,w_d + 1.6\,w_i)$

يبين الشكل أدناه الإطار مبيَّناً عليه الأحمال ومواقع المفاصل اللدنة، ويُحدَّد العزم اللدن في العمود وفي الجائز كمايلي:

العلاقة 17-21
$$M_{pc} = R_H\,e = 5.55 R_H \qquad (1)$$

العلاقة 17-22، العلاقة 17-15، العلاقة 17-16
$$\left.\begin{aligned} M_{pb} &= 0.75\,M_{pc} = M_x - R_H\,g \\ g &= 6 + 0.4\,x \\ M_x &= 90.9\,x - 9.09\,x^2/2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{aligned} M_{pb} &= 0.75\,M_{pc} \\ &= 90.9\,x - 9.09\,x^2/2 \\ &\quad - R_H\,(6+0.4\,x) \end{aligned} \qquad (2)$$

نعوض العلاقة (1) في العلاقة (2) ينتج:

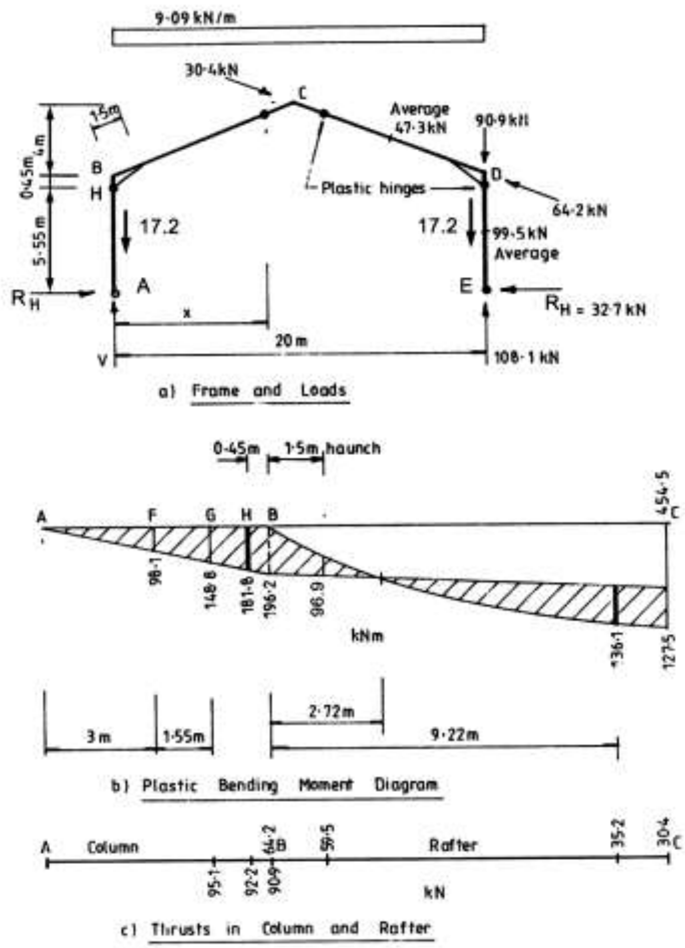
$$R_H = \frac{90.9\,x - 4.55\,x^2}{10.16 + 0.4\,x} \qquad (3)$$

$$dR_H / dx = 0 \Rightarrow x^2 + 50.7\,x - 507.4 = 0 \Rightarrow x = 8.56\,m$$

نعوض x في العلاقة (3) ثم نعوض الناتج في العلاقة (1) ينتج:

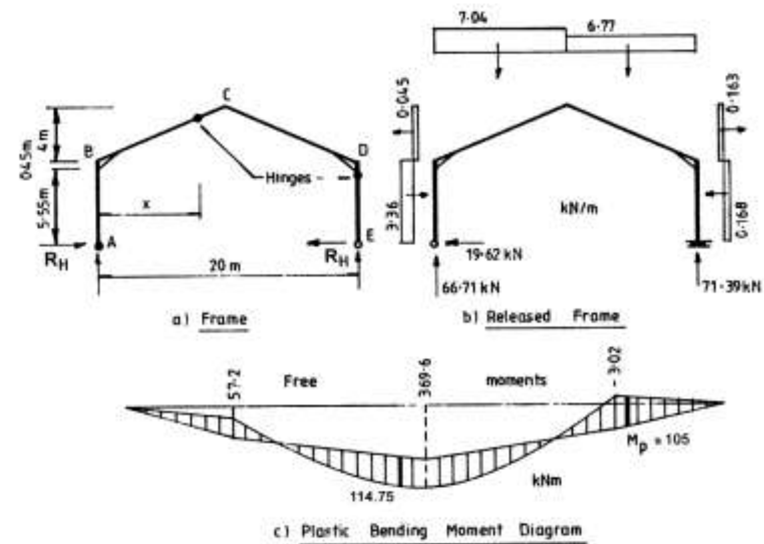
$$R_H = 32.7\,kN\ ,\ M_{pc} = 181.5\,kN\,m\ ,\ M_{pb} = 0.75 M_{pc} = 136.1\,kN\,m$$

ويبين الشكل أدناه مخطط العزم اللدن ومخطط القوى المحورية



* تحت تأثير الأحمال الميتة والحية والرياح $1.2(w_d + w_i + W_{wb})$

سيتم تحليل أحمال الرياح المطبّقة على السقف إلى مركبتين إحداهما أفقية والأخرى شاقولية تضاف إلى الأحمال الميتة والحية. ويبين الشكل أدناه (a) المواقع المتوقّعة للمفاصل اللدنة في الإطار، كما يبين الشكل (b) الأحمال المصعّدة مطبّقة على الإطار بعد تحويله إلى إطار مقرر سكونياً.



يُحدَّد عزم الانعطاف الحر في أية نقطة من جائز الإطار المقرر سكونياً تبعد x عن الركبة بالعلاقة التالية:

$$M_x = 57.24 + 66.5\,x1 - 3.52\,x^2 \qquad (4)$$

كما يُحدَّد العزم اللدن في كل من العمود والجائز بالعلاقتين التاليتين:

$$M_{pc} = 5.55 R_H + 0.168 \text{x} 5.55^2 / 2 = 5.55 R_H + 2.59 \qquad (5)$$

$$M_{pb} = 0.75 M_{pc} = M_x - R_H\,(6 + 0.4\,x) \qquad (6)$$

نعوض العلاقتين (4) و (5) في (6) فنجد:

$$0.75(5.55 R_H + 2.59) = 57.24 + 66.5\,x - 3.52\,x^2 - R_H\,(6 + 0.4\,x)$$

بالإصلاح نجد:

$$R_H = \frac{55.29 + 66.5\,x - 3.52\,x^2}{10.16 + 0.4\,x} \qquad (7)$$

يتضح من العلاقة (5) أن العزم اللدن M_{pc} يكون أعظمياً عندما تكون R_H أكبر مايمكن. وكي نحدد القيمة العظمى لـــ R_H نضع:

$$dR_H / dx = 0 \Rightarrow 1.408\,x^2 + 71.53\,x - 653.52 = 0 \Rightarrow x = 7.9\,m$$

نعوض x في العلاقة (7) والناتج في العلاقة (5) ينتج:

$$R_H = 27.1\,kN \;,\; M_{pc} = 153\,kN\,m \;,\; M_{pb} = 114.75\,kN\,m$$

هذان العزمان اللدنان أقل من نظيريهما في حالة التحميل السابقة لذا فحالة الأحمال الشاقولية هي المسيطرة. يبين الشكل (c) أعلاه مخطط العزم اللدن الناتج عن حالة تحميل الأحمال الميتة والحية والرياح.

ثالثاً : تصميم العمود

* يتعرض مقطع العمود عند أسفل الركبة (النقطة H) إلى عزم لدن $M_{pc} = 181.8\,kN\,m$ وإلى قوة محورية $F = 92.2\,kN$

* نحدد بشكل أولي معامل المقطع اللدن المطلوب لمقاومة العزم اللدن

العلاقة 5-2 $$S_{req} = M_{pc} / p_y \Rightarrow S_{req} = 181.8 \text{ x} 10^3 / 275 = 661.1\,cm^3$$

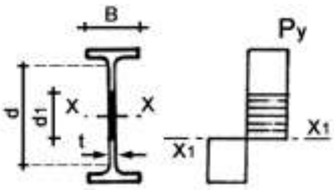
* نجرب المقطع UB 406 x 140 x 46 ذي الخصائص التالية:

$$S = 888\,cm^3 \;,\; A = 59\,cm^2 \;,\; I_x = 15600\,cm^4 \;,\; r_x = 16.3\,cm$$
$$r_y = 3.02\,cm \;,\; D = 403.2\,mm \;,\; B = 142.2\,mm \;,\; d = 360.4\,mm$$
$$t = 6.8\,mm \;,\; T = 11.2\,mm \;,\; b/T = 6.35 \;,\; d/t = 53$$

الجدول 2-1 – $T = 11.2\,mm < 20 \Rightarrow p_y = 275\,N/mm^2 \;,\; \varepsilon = (275/p_y)^{1/2} = 1.0$

الجدول 2-2 – تصنيف المقطع: $b/T = 5.75 < 8.5\,\varepsilon \Rightarrow$ الجناح لدن

يُحدَّد طول جزء الجسد d_1 الذي يتحمل قوة الضغط المحورية التصميمية كمايلي:

 $d_1 t\ p_y = F \Rightarrow d_1 = \frac{92.2 \times 10^3}{6.8 \times 275} = 49.3\,mm$ $y_c = (d + d_1)/2 = 204.8\,mm \Rightarrow$ $\alpha = 2\,y_c / d = 1.137$ الجسد لدن $\frac{d}{t} = 53 < \frac{79\,\varepsilon}{0.4 + 0.6\,\alpha} = 73 \Rightarrow$	الجدول 2-2 الجدول 2-2
إذاً المقطع بكامله لدن	
$n = \frac{F}{P_p} = \frac{F}{A\,p_y} = \frac{92.2 \times 10^3}{59 \times 10^2 \times 275} = 0.057 \Rightarrow \bar{\alpha} = 1.0$	الجدول 17-2
يُحدَّد معامل المقطع اللدن المخفض كمايلي:	
$S_r = \bar{\alpha}\,S = 654 cm^3 > S_{req} \Rightarrow$ إذاً المقطع المختار كافٍ	العلاقة 17-45
رابعاً: تصميم جائز الإطار	
يتعرض مقطع الجائز عند المفصل اللدن إلى عزم لدن	
$M_{pb} = 136.1\,kN\,m$ وإلى قوة محورية $F = 35.2\,kN$	
* نحدد بشكل أولي معامل المقطع اللدن المطلوب.	
$S_{req} = M_{pb}/p_y = 136.1 \times 10^3 / 275 = 494.9\,cm^3$	العلاقة 5-2
* نجرب المقطع $UB\ 356 \times 127 \times 39$ ذي الخصائص التالية:	
$S = 654\,cm^3\ ,\ A = 49.4\,cm^2\ ,\ I_x = 10100\,cm^4\ ,\ Z_x = 572\,cm^3$ $r_x = 14.3\,cm\ ,\ r_y = 2.69\,cm\ ,\ D = 353.4\,mm\ ,\ B = 126\,mm$ $t = 6.6\,mm\ ,\ T = 10.7\,mm\ ,\ d = 311.6\,mm\ ,\ b/T = 5.89\ ,\ d/t = 47.2$	
$T = 10.7\,mm < 20 \Rightarrow p_y = 275 N/mm^2\ ,\ \varepsilon = (275/p_y)^{1/2} = 1.0$	الجدول 2-1
– تصنيف المقطع: الجناح لدن $b/T = 5.89 < 8.5\,\varepsilon \Rightarrow$	الجدول 2-2
يُحدَّد طول جزء الجسد d_1 الذي يتحمل قوة الضغط المحورية التصميمية كمايلي:	
$d_1 t\ p_y = F \Rightarrow d_1 = \frac{35.2 \times 10^3}{6.6 \times 275} = 19.4$	

$$y_c = (d + d_1)/2 = (311.6 + 19.4)/2 = 165.5 \Rightarrow \alpha = 2\, y_c / d = 1.06$$

الجدول 2-2 $\frac{d}{t} = 47.2 < \frac{79\,\varepsilon}{0.4 + 0.6\,\alpha} = 76 \Rightarrow$ الجسد لدن

إذاً المقطع بكامله لدن

الجدول 17-2 $n = \frac{F}{P_p} = \frac{F}{A\, p_y} = \frac{35.2 \text{ x} 10^3}{49.4 \text{ x} 10^2 \text{ x } 275} = 0.026 \Rightarrow \bar{\alpha} = 1.0$

يُحدَّد معامل المقطع اللدن المخفض كمايلي:

العلاقة 17-45 $S_r = \bar{\alpha}\, S = 654 cm^3 > S_{req} \Rightarrow$ إذاً المقطع المختار كافٍ

* يتم التأكد من بقاء مقطع الجائز مرناً عند نهاية الشطفة حيث $M = 96.9 \; kN\, m \; , \; F = 59.5 \; kN$ بتطبيق العلاقة التالية:

العلاقة 17-20 $\frac{F}{A} + \frac{M}{Z_x} = \frac{59.5 \text{ x} 10^3}{49.4 \text{ x} 10^2} + \frac{96.9 \text{ x} 10^6}{572 \text{ x} 10^3} = 181.4 \; N/mm^2 < p_y = 275 \; N/mm^2$

إذاً المقطع يبقى مرناً.

خامساً : قيود العمود ودراسة استقراره

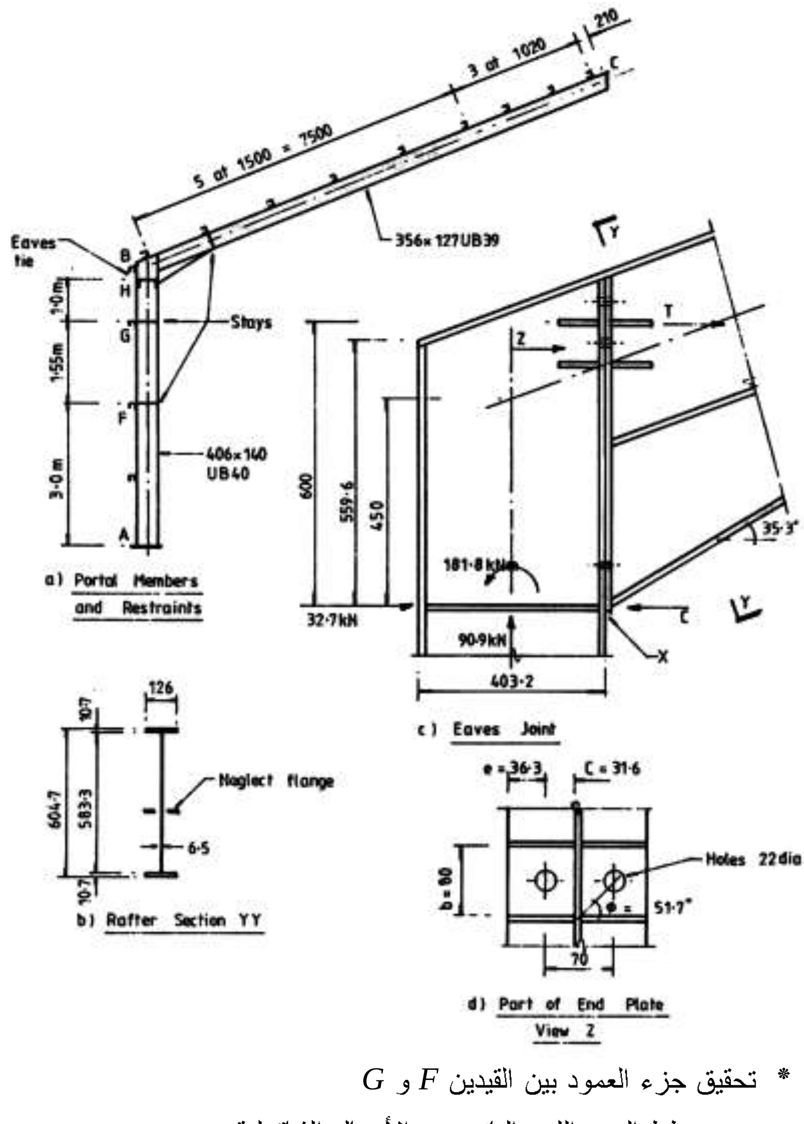
* سيتم تأمين قيد فتل كالمبين في الشكل (17-4) عند المفصل اللدن في أسفل الشطفة كما يجب تنفيذ قيد فتل ثاني على بعد L_m من قيد الفتل السابق وتُحدَّد هذه المسافة كمايلي:

العلاقة 17-47

$$\left.\begin{array}{l} L_m = \dfrac{38 \text{ x } r_y}{\left[(f_c/130) + (p_y/275)^2\,(x/36)^2 \right]^{1/2}} \\ f_c = F/A = 92.2 \text{ x} 10/59 = 15.63 \; N/mm^2 \\ p_y = 275 \; N/mm^2 \; , \; r_y = 30.2 \; mm \\ x \approx D/T = 36 \end{array}\right\} \Rightarrow L_m = 1285 \; mm$$

يبين الشكل أدناه مواقع قيود العمود حيث تم اختيار أول قيد عند المفصل في النقطة H والقيد الثاني في النقطة G على بعد 1.0m من

المفصل (أقل من L_m) والقيد الثالث في النقطة F على بعد 1.55m من النقطة G.



* تحقيق جزء العمود بين القيدين F و G

– من مخطط العزم اللدن الناتج عن الأحمال الشاقولية نجد:

$M_G = 148.8\,kN\,m\ ,\ M_F = 98.1\,kN\,m\ ,\ F_G = 95.1\,kN$

– يُحدَّد الطول الفعّال للعمود في مستوي الإطار ومقاومة الضغط كمايلي:

العلاقة 17-1

$$k_c = 2.0 + 0.45 \frac{15600 / 6.0}{10100 / 21.54} = 4.49$$

$$L_{Ecx} = k_c \ L_c = 4.49 \text{ x } 600 = 2694 \ cm \Rightarrow \lambda_x = L_{Ecx} / r_x = 165.3$$

الجدول 4-3a

$$(p_y = 275 N / mm^2 \ , \ \lambda_x = 165.3) \ \Rightarrow \ p_{cx} = 67 \, N / mm^2$$

– يُحدَّد الطول الفعّال لجزء العمود GF ومقاومة الضغط كمايلي:

الجدول 4-4

$$L_{Ey} = 1.0 \, L = 1.55 m \ \Rightarrow \ \lambda_y = L_{Ey} / r_y = 155 / 3.02 = 51.3$$

الجدول 4-3b

$$(p_y = 275 N / mm^2 \ , \ \lambda_y = 51.3) \ \Rightarrow \ p_{cy} = 235 N / mm^2$$

$$\therefore p_c = p_{cx} = 67 \, N / mm^2$$

– تحديد العزم المقاوم لتجنيب الفتل:

$$\lambda = \lambda_y = 51.3 \ , \ u = 0.9 \ , \ x = D / T = 36$$

الجدول 5-4

$$\left. \begin{array}{l} \lambda / x = 1.425 \\ N = 0.5 \end{array} \right\} \Rightarrow \ v = 0.972$$

الجدول 5-9

$$\beta = M_F \ / M_G = 98.1 / 148.8 = 0.66 \ \Rightarrow \ m = 0.83$$

الجدول 5-5

بما أن الفتحة غير محمّلة فإن $n = 1.0$

العلاقة 5-7

$$\lambda_{LT} = n \, u \, v \, \lambda = 1.0 \text{ x } 0.9 \text{ x } 0.972 \text{ x } 51.3 = 45$$

الجدول 5-10

$$(p_y = 275 N / mm^2 \ , \ \lambda_{LT} = 45) \ \Rightarrow \ p_b = 250 N / mm^2$$

العلاقة 5-6

$$M_b = p_b \, S_x = 250 \text{ x } 888 \text{ x } 10^{-3} = 222 kN \, m$$

– لتحقيق التجنيب الكلي يجب تحقيق علاقة الترابط التالية:

العلاقة 8-2

$$\frac{F}{A_g \ p_c} + \frac{m \, M_x}{M_b} \ \leq 1.0$$

$$\frac{95.1}{59 \text{ x } 67 \text{ x } 10^{-1}} + \frac{0.83 \text{ x } 148.8}{222} = 0.8 \ < \ 1.0 \qquad o.k.$$

سادساً : قيود الجائز ودراسة استقراره

* يبين الشكل (b) السابق مقطع الجائز عند الركبة مباشرةً، وتُحدَّد خواص هذا المقطع بإهمال الجناح الوسطي كمايلي:

$$A=(D-2T)\,t+2\,BT=58.33\text{ x }0.65+2\text{ x}12.6\text{x}1.07=64.9cm^2$$

$$S_x=0.25\,BD^2-0.25\,(B-t)\;(D-2T)^2$$

$$=0.25\text{ x}12.6\text{ x }60.47^2-0.25\,(12.6-0.65)\text{ x }58.33^2=1353\;cm^3$$

$$I_y\approx 2\text{ x}T\,B^3\,/12=2\text{ x}1.07\text{x}12.6^3\,/12=356.7\;cm^4$$

$$r_y=(I_y/A)^{1/2}=2.35\;cm$$

العلاقة 9-6

العلاقة 9-8

الشكل 9-5

$$\left.\begin{aligned}&x=0.566\,h_s\;(A/J)^{1/2}\\&J=\left[2\text{ x}1.07^3\text{ x}12.6+0.65^3\text{ x }58.33\right]/3=15.6\,cm^4\\&h_s=58.33+1.07=59.4\,cm\end{aligned}\right\}\Rightarrow\quad x=68.6$$

* سيتم تامين استقرار جائز الإطار في منطقة الركبة بأخذ تأثير قيود الجناح المشدود بالحسبان.

– يبين الشكل (c) السابق مخططاً تفصيلياً لمنطقة الركبة حيث يتضح أن ارتفاع الشطفة يساوي $559.5\;\;mm$ وعليه تُحدَّد نسبة ارتفاع الشطفة إلى ارتفاع مقطع الجائز بدون شطفة كمايلي:

الجدول 17-3

$$\frac{\text{ارتفاع الشطفة}}{\text{ارتفاع الجائز}}=\frac{559.5}{353.4}=1.58\Rightarrow k_1=546$$

تُحدّد المسافة (L_5) من الركبة إلى أول قيد للجناح المضغوط بتطبيق العلاقة التالية:

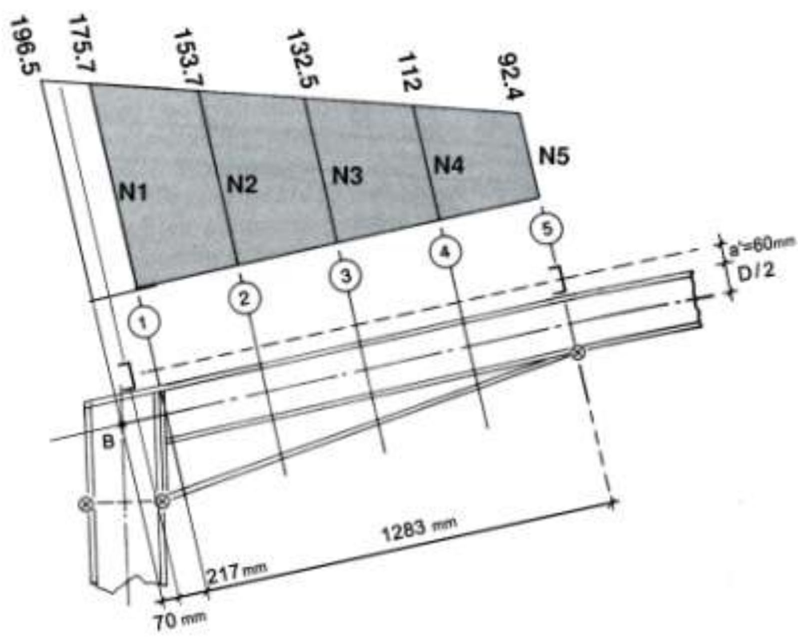
العلاقة 17-48

$$L_s = \frac{k_1\, r_y\, x}{(72\, x^2 - 10^4)^{1/2}} = \frac{546 \text{ x } 2.35 \text{ x } 68.6}{(72 \text{ x } 68.6^2 \text{ -}10^4)^{1/2}} = 1535\ mm$$

لذلك سيتم تزويد الجائز بقيد فتل عند نهاية الشطفة.

سابعاً : دراسة استقرار الشطفة

* يبين الشكل أدناه العزم المطبّق علـــى الجائز في منطقة الشطفة ســـيتم تقسيم الشطفة إلى أربعة أقسام متساوية. ويوضح الشكل أدناه عزم الانعطاف المطبّق عند كل مقطع من (1) إلى (5).



* خواص المقطع العرضي عند المقاطع (1) إلى (5)

يبين الجدول التالي خواص المقطع العرضي وطاقة تحمّله على العزم والعزم المطبّق.

المقطع	1	2	3	4	5
$D\ mm$	604.7	541.9	479	416.2	353.4
$I_c\ cm^4$	356.7	356.7	356.7	356.7	358
$A\ cm^2$	64.9	60.8	56.7	52.6	49.4
$r_y\ cm$	2.35	2.42	2.5	2.6	2.69
$s_x\ cm^3$	1353	1156.4	971.6	800	654
طاقة تحمّل العزم $M = p_y\ S_x\ kN\,m$	372	318	267.2	220	179.8
العزم المطبّق $N\ \ kN\ m$	175.7	153.7	132.5	112.5	92.4
$N / S_x\ \ N / mm^2$	129.8	132.9	136.3	140.6	141.3
N / M	0.472	0.483	0.496	0.511	0.514

* تحديد مقاومة الانعطاف p_b

– تحديد نسبة النحافة المكافئة للشطفة

$$\lambda = L / r_y = 150 / 2.35 = 63.8$$

$$x = D / \mathrm{T} = 353.4 / 10.7 = 33$$

$$h_s = D - T = 353.4 - 10.7 = 342.7mm$$

$$a = a' + D/2 = 60 + 353.4/2 = 236.7mm$$ (انظر الشكل أعلاه)

العلاقة 17-9

$$v_t = \left[\frac{4 \text{ x } 236.7/342.7}{1 + (2 \text{ x } 236.7/342.7)^2 + 0.05(63.8/33)^2} \right]^{1/2} = 0.945$$

العلاقة 17-10

$$\left. \begin{array}{l} \mathrm{R} = \dfrac{604.7}{353.4} = 1.71 \\ q = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow\ c = 1 + \frac{3}{33 - 9}\ (1.71 - 1)^{2/3} = 1.1$$

العلاقة 17-11

$$n_t = \left\{ \frac{1}{12} \left[\frac{N_1}{M_1} + \frac{3\,N_2}{M_2} + \frac{4\,N_3}{M_3} + \frac{3\,N_4}{M_4} + \frac{N_5}{M_5} + 2\ \left(\frac{N_s}{M_s} - \frac{N_E}{M_E} \right) \right] \right\}^{1/2}$$

$N_S / M_S = 0.511$ الأكبر من N_4 / M_4 , N_3 / M_3 , N_2 / M_2

$N_E / M_E = 0.514$ الأكبر من N_5 / M_5 , N_1 / M_1

$$N_s / M_s - N_E / M_E = -0.03 < 0.0 \Rightarrow N_s / M_s - N_E / M_E = 0$$

$$\therefore n_t = \left\{ \frac{1}{12} [\, 0.472 + 3 \text{ x } 0.483 + 4 \text{ x } 0.496 + 3 \text{ x } 0.511 + 0.514 \,] \right\}^{1/2} = 0.7$$

$$u = 1.0$$

العلاقة 17-8

$$\lambda_{TB} = n_t \, u \, v_t \, c \, \lambda = 0.7 \text{ x} 1.0 \text{ x} 0.945 \text{x} 1.1 \text{x} 63.8 = 46.4$$

الجدول 5-11

$$(\, p_y = 275 N / mm^2 \ , \ \lambda_{TB} = 46.4 \,) \Rightarrow p_b = 225 N / mm^2$$

* يجب أن تحقق الشطفة علاقة الترابط التالية:

العلاقة 17-4

$$\frac{F}{A} + \frac{M}{S_x} \leq p_b$$

يتضح من الجدول أعلاه أن أكبر نسبة عزم مطبّق إلى معامل مقطع لدن تحصل عند المقطع (5) لذلك سيتم تحقيق هذا المقطع مع الأخذ بالحسبان أن القوة المحورية المطبّقة عند هذا المقطع $F = 59.5\, kN$ (انظر مخطط عزم الانعطاف والقوى المحورية أعلاه).

$$\therefore \ \frac{59.5 \, x \, 10}{49.4} + 141.3 = 153.3 \ N / mm^2 < \ p_b = 225 \ N / mm^2 \qquad o.k.$$

إذاً استقرار الشطفة محقق.

ثامناً : دراسة الاستقرار الجانبي

يتم التحقيق من الاستقرار الجانبي للإطار بتحقيق العلاقة (17-46).

– بما أن نسبة ارتفاع المقطع (1) إلى ارتفاع المقطع (5) (انظر الشكل والجدول أعلاه) أقل من (2) فإن $L_b = L = 20 m$

$$\rho = 2\,(\frac{I_c}{I_r})\,(\frac{L}{h}) = 2 \text{ x } \frac{15600}{10100} \text{ x } \frac{20}{6} = 10.29$$

$$L_r = L/\cos\theta = 20/\cos 21.8^{\circ} = 21.54\,m$$

$$\left.\begin{aligned} W_r &= 9.09 \text{ x } 20 = 181.8 \\ W_o &= 16\,M_{pb}\,/\,L \\ M_{pb} &= 654 \text{ x } 275 \text{ x} 10^{-3} = 179.9\,kN\,m \end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{aligned} W_o &= 143.9\ kN \\ \Omega &= W_r\,/\,W_o = 1.26 \end{aligned}$$

العلاقة 17-46

$$\frac{L_b}{D} \le \frac{44}{\Omega}\,\frac{L}{h}\,(\frac{\rho}{4+\rho\,L_r\,/\,L})\,(\frac{275}{p_{yb}})$$

$$\frac{20000}{353.4} = 26.6 < \frac{44}{1.26} \text{ x } \frac{20}{6}(\frac{10.29}{4+10.29 \text{ x } 21.54\,/\,20}) = 79.4$$

إذاً الاستقرار الجانبي للإطار مؤمّن.

تاسعاً : تصميم الوصلات

يبين الشكل قبل السابق وصلة الركبة، وسنشرح فيمايلي بعض التحقيقات المطلوبة.

* قوة الشد في صفّي البراغي

$$T = (181.8 - 90.9 \text{ x } 0.403/2)\,/\,0.6 = 272.5\,kN$$

* قوتي الشد والقص في البرغي الواحد

$$F_t = T\,/\,4 = 68.13\ kN$$
$$F_s = V\,/\,6 = 90.0\,/\,6 = 15.15\ kN$$

* إذا تم استخدام براغي قطر $20\,mm$ ماركة $Gr\ 8.8$ يتم تحقيق طاقة تحمّل البرغي الواحد على الشد وعلى القص كمايلي:

العلاقة 10-6

$$P_t = p_t\,A_t = 450 \text{x} 245 \text{x} 10^{-3} = 110\ kN$$

العلاقة 10-1

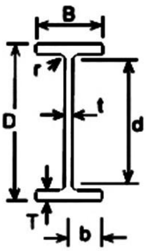
$$P_s = p_s\,A_s = 375 \text{x} 245 \text{x} 10^{-3} = 91.9\,kN$$

العلاقة 10-7	$\frac{F_t}{p_t} + \frac{F_s}{p_s} = \frac{68.13}{110} + \frac{15.15}{91.9} = 0.78 < 1.4 \qquad o.k.$
	* تحقيق جناح العمود وصفيحة النهاية
	بمساواة العلاقتين (17-54) و (17-55) ينتج:
	$\frac{272.5 \text{ x} 10^3 \text{ x} 80}{8} = 4\, m\,(36.3 + 31.6) - m \text{ x } 22\ (1 + \cos 51.7^\circ) + \frac{m \text{ x} 80}{31.6}\ (80 - 0.5 \text{ x } 22 \sin 51.7^\circ)$
	$\therefore\ m = 6537.9\ N\,mm/mm$
العلاقة 17-56	$t = (4 \text{ x} 6537.9/275)^{1/2} = 9.75\, mm$
	سماكة جناح العمود $11.2\, mm$ كافية وكذلك سماكة صفيحة النهاية $12\, mm$ كافية أيضاً.
	* تحقيق جسد العمود على القص
العلاقة 5-1	$F_v = 0.6 \text{ x } p_y\ Dt = 0.6 \text{ x } 275 \text{ x } 402.3 \text{ x } 6.9 \text{ x} 10^{-3}$
	$= 458.8\ kN > T = 272.8\ kN \qquad o.k.$
	يمكن إجراء تحقيقات مشابهة لوصلة الذروة.

ملحق (A)

جداول بخصائص المقاطع الفولاذية

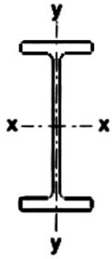
Section Properties



UNIVERSAL BEAMS

DIMENSIONS

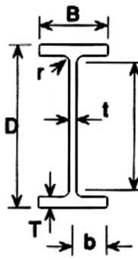
Section Designation	Mass Per Metre	Depth Of Section	Width Of Section	Thickness		Root Radius	Depth Between Fillets	Ratios For Local Buckling	
				Web	Flange			Flange	Web
	kg/m	D mm	B mm	t mm	T mm	r mm	d mm	b/T	d/t
914x419x388	388.0	921.0	420.5	21.4	36.6	24.1	799.6	5.74	37.4
914x419x343	343.3	911.8	418.5	19.4	32.0	24.1	799.6	6.54	41.2
914x305x289	289.1	926.6	307.7	19.5	32.0	19.1	824.4	4.81	42.3
914x305x253	253.4	918.4	305.5	17.3	27.9	19.1	824.4	5.47	47.7
914x305x224	224.2	910.4	304.1	15.9	23.9	19.1	824.4	6.36	51.8
914x305x201	200.9	903.0	303.3	15.1	20.2	19.1	824.4	7.51	54.6
838x292x226	226.5	850.9	293.8	16.1	26.8	17.8	761.7	5.48	47.3
838x292x194	193.8	840.7	292.4	14.7	21.7	17.8	761.7	6.74	51.8
838x292x176	175.9	834.9	291.7	14.0	18.8	17.8	761.7	7.76	54.4
762x267x197	196.8	769.8	268.0	15.6	25.4	16.5	686.0	5.28	44.0
762x267x173	173.0	762.2	266.7	14.3	21.6	16.5	686.0	6.17	48.0
762x267x147	146.9	754.0	265.2	12.8	17.5	16.5	686.0	7.58	53.6
762x267x134	133.9	750.0	264.4	12.0	15.5	16.5	686.0	8.53	57.2
686x254x170	170.2	692.9	255.8	14.5	23.7	15.2	615.1	5.40	42.4
686x254x152	152.4	687.5	254.5	13.2	21.0	15.2	615.1	6.06	46.6
686x254x140	140.1	683.5	253.7	12.4	19.0	15.2	615.1	6.68	49.6
686x254x125	125.2	677.9	253.0	11.7	16.2	15.2	615.1	7.81	52.6
610x305x238	238.1	635.8	311.4	18.4	31.4	16.5	540.0	4.96	29.3
610x305x179	179.0	620.2	307.1	14.1	23.6	16.5	540.0	6.51	38.3
610x305x149	149.2	612.4	304.8	11.8	19.7	16.5	540.0	7.74	45.8
610x229x140	139.9	617.2	230.2	13.1	22.1	12.7	547.6	5.21	41.8
610x229x125	125.1	612.2	229.0	11.9	19.6	12.7	547.6	5.84	46.0
610x229x113	113.0	607.6	228.2	11.1	17.3	12.7	547.6	6.60	49.3
610x229x101	101.2	602.6	227.6	10.5	14.8	12.7	547.6	7.69	52.2
533x210x122	122.0	544.5	211.9	12.7	21.3	12.7	476.5	4.97	37.5
533x210x109	109.0	539.5	210.8	11.6	18.8	12.7	476.5	5.61	41.1
533x210x101	101.0	536.7	210.0	10.8	17.4	12.7	476.5	6.03	44.1
533x210x92	92.1	533.1	209.3	10.1	15.6	12.7	476.5	6.71	47.2
533x210x82	82.2	528.3	208.8	9.6	13.2	12.7	476.5	7.91	49.6



UNIVERSAL BEAMS

PROPERTIES

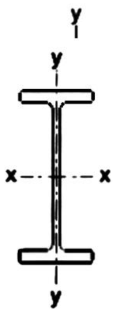
Section Designation	Second Moment Of Area		Radius Of Gyration		Elastic Modulus		Plastic Modulus		Area Of Section
	Axis x-x cm^4	Axis y-y cm^4	Axis x-x cm	Axis y-y cm	Axis x-x cm^3	Axis y-y cm^3	Axis x-x cm^3	Axis y-y cm^3	A cm^2
914x419x388	719600	45440	38.2	9.59	15630	2161	17670	3341	494
914x419x343	625800	39160	37.8	9.46	13730	1871	15480	2890	437
914x305x289	504200	15600	37.0	6.51	10880	1014	12570	1601	368
914x305x253	436300	13300	36.8	6.42	9501	871	10940	1371	323
914x305x224	376400	11240	36.3	6.27	8269	739	9535	1163	286
914x305x201	325300	9423	35.7	6.07	7204	621	8351	982	256
838x292x226	339700	11360	34.3	6.27	7985	773	9155	1212	289
838x292x194	279200	9066	33.6	6.06	6641	620	7640	974	247
838x292x176	246000	7799	33.1	5.90	5893	535	6808	842	224
762x267x197	240000	8175	30.9	5.71	6234	610	7167	959	251
762x267x173	205300	6850	30.5	5.58	5387	514	6198	807	220
762x267x147	168500	5455	30.0	5.40	4470	411	5156	647	187
762x267x134	150700	4788	29.7	5.30	4018	362	4644	570	171
686x254x170	170300	6630	28.0	5.53	4916	518	5631	811	217
686x254x152	150400	5784	27.8	5.46	4374	455	5000	710	194
686x254x140	136300	5183	27.6	5.39	3987	409	4558	638	178
686x254x125	118000	4383	27.2	5.24	3481	346	3994	542	159
610x305x238	209500	15840	26.3	7.23	6589	1017	7486	1574	303
610x305x179	153000	11410	25.9	7.07	4935	743	5547	1144	228
610x305x149	125900	9308	25.7	7.00	4111	611	4594	937	190
610x229x140	111800	4505	25.0	5.03	3622	391	4142	611	178
610x229x125	98610	3932	24.9	4.97	3221	343	3676	535	159
610x229x113	87320	3434	24.6	4.88	2874	301	3281	469	144
610x229x101	75780	2915	24.2	4.75	2515	256	2881	400	129
533x210x122	76040	3388	22.1	4.67	2793	320	3196	500	155
533x210x109	66820	2943	21.9	4.60	2477	279	2828	436	139
533x210x101	61520	2692	21.9	4.57	2292	256	2612	399	129
533x210x92	55230	2389	21.7	4.51	2072	228	2360	356	117
533x210x82	47540	2007	21.3	4.38	1800	192	2059	300	105



UNIVERSAL BEAMS

DIMENSIONS

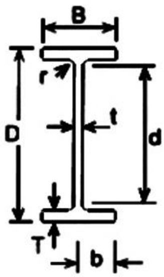
Section Designation	Mass Per Metre kg/m	Depth Of Section D mm	Width Of Section B mm	Thickness Web t mm	Thickness Flange T mm	Root Radius r mm	Depth Between Fillets d mm	Ratios For Local Buckling Flange b/T	Ratios For Local Buckling Web d/t
457x191x98	98.3	467.2	192.8	11.4	19.6	10.2	407.6	4.92	35.8
457x191x89	89.3	463.4	191.9	10.5	17.7	10.2	407.6	5.42	38.8
457x191x82	82.0	460.0	191.3	9.9	16.0	10.2	407.6	5.98	41.2
457x191x74	74.3	457.0	190.4	9.0	14.5	10.2	407.6	6.57	45.3
457x191x67	67.1	453.4	189.9	8.5	12.7	10.2	407.6	7.48	48.0
457x152x82	82.1	465.8	155.3	10.5	18.9	10.2	407.6	4.11	38.8
457x152x74	74.2	462.0	154.4	9.6	17.0	10.2	407.6	4.54	42.5
457x152x67	67.2	458.0	153.8	9.0	15.0	10.2	407.6	5.13	45.3
457x152x60	59.8	454.6	152.9	8.1	13.3	10.2	407.6	5.75	50.3
457x152x52	52.3	449.8	152.4	7.6	10.9	10.2	407.6	6.99	53.6
406x178x74	74.2	412.8	179.5	9.5	16.0	10.2	360.4	5.61	37.9
406x178x67	67.1	409.4	178.8	8.8	14.3	10.2	360.4	6.25	41.0
406x178x60	60.1	406.4	177.9	7.9	12.8	10.2	360.4	6.95	45.6
406x178x54	54.1	402.6	177.7	7.7	10.9	10.2	360.4	8.15	46.8
406x140x46	46.0	403.2	142.2	6.8	11.2	10.2	360.4	6.35	53.0
406x140x39	39.0	398.0	141.8	6.4	8.6	10.2	360.4	8.24	56.3
356x171x67	67.1	363.4	173.2	9.1	15.7	10.2	311.6	5.52	34.2
356x171x57	57.0	358.0	172.2	8.1	13.0	10.2	311.6	6.62	38.5
356x171x51	51.0	355.0	171.5	7.4	11.5	10.2	311.6	7.46	42.1
356x171x45	45.0	351.4	171.1	7.0	9.7	10.2	311.6	8.82	44.5
356x127x39	39.1	353.4	126.0	6.6	10.7	10.2	311.6	5.89	47.2
356x127x33	33.1	349.0	125.4	6.0	8.5	10.2	311.6	7.38	51.9
305x165x54	54.0	310.4	166.9	7.9	13.7	8.9	265.2	6.09	33.6
305x165x46	46.1	306.6	165.7	6.7	11.8	8.9	265.2	7.02	39.6
305x165x40	40.3	303.4	165.0	6.0	10.2	8.9	265.2	8.09	44.2
305x127x48	48.1	311.0	125.3	9.0	14.0	8.9	265.2	4.47	29.5
305x127x42	41.9	307.2	124.3	8.0	12.1	8.9	265.2	5.14	33.2
305x127x37	37.0	304.4	123.4	7.1	10.7	8.9	265.2	5.77	37.4



UNIVERSAL BEAMS

PROPERTIES

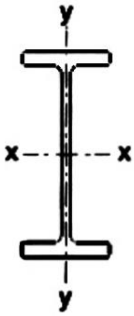
Section Designation	Second Moment Of Area		Radius Of Gyration		Elastic Modulus		Plastic Modulus		Area Of Section
	Axis x-x cm^4	Axis y-y cm^4	Axis x-x cm	Axis y-y cm	Axis x-x cm^3	Axis y-y cm^3	Axis x-x cm^3	Axis y-y cm^3	A cm^2
457x191x98	45730	2347	19.1	4.33	1957	243	2232	379	125
457x191x89	41020	2089	19.0	4.29	1770	218	2014	338	114
457x191x82	37050	1871	18.8	4.23	1611	196	1831	304	104
457x191x74	33320	1671	18.8	4.20	1458	176	1653	272	94.6
457x191x67	29380	1452	18.5	4.12	1296	153	1471	237	85.5
457x152x82	36590	1185	18.7	3.37	1571	153	1811	240	105
457x152x74	32670	1047	18.6	3.33	1414	136	1627	213	94.5
457x152x67	28930	913	18.4	3.27	1263	119	1453	187	85.6
457x152x60	25500	795	18.3	3.23	1122	104	1287	163	76.2
457x152x52	21370	645	17.9	3.11	950	84.6	1096	133	66.6
406x178x74	27310	1545	17.0	4.04	1323	172	1501	267	94.5
406x178x67	24330	1365	16.9	3.99	1189	153	1346	237	85.5
406x178x60	21600	1203	16.8	3.97	1063	135	1199	209	76.5
406x178x54	18720	1021	16.5	3.85	930	115	1055	178	69.0
406x140x46	15690	538	16.4	3.03	778	75.7	888	118	58.6
406x140x39	12510	410	15.9	2.87	629	57.8	724	90.8	49.7
356x171x67	19460	1362	15.1	3.99	1071	157	1211	243	85.5
356x171x57	16040	1108	14.9	3.91	896	129	1010	199	72.6
356x171x51	14140	968	14.8	3.86	796	113	896	174	64.9
356x171x45	12070	811	14.5	3.76	687	94.8	775	147	57.3
356x127x39	10170	358	14.3	2.68	576	56.8	659	89.1	49.8
356x127x33	8249	280	14.0	2.58	473	44.7	543	70.3	42.1
305x165x54	11700	1063	13.0	3.93	754	127	846	196	68.8
305x165x46	9899	896	13.0	3.90	646	108	720	166	58.7
305x165x40	8503	764	12.9	3.86	560	92.6	623	142	51.3
305x127x48	9575	461	12.5	2.74	616	73.6	711	116	61.2
305x127x42	8196	389	12.4	2.70	534	62.6	614	98.4	53.4
305x127x37	7171	336	12.3	2.67	471	54.5	539	85.4	47.2



UNIVERSAL BEAMS

DIMENSIONS

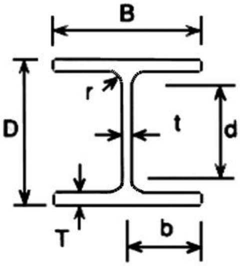
Section Designation	Mass Per Metre kg/m	Depth Of Section D mm	Width Of Section B mm	Thickness Web t mm	Thickness Flange T mm	Root Radius r mm	Depth Between Fillets d mm	Ratios For Local Buckling Flange b/T	Ratios For Local Buckling Web d/t
305x102x33	32.8	312.7	102.4	6.6	10.8	7.6	275.9	4.74	41.8
305x102x28	28.2	308.7	101.8	6.0	8.8	7.6	275.9	5.78	46.0
305x102x25	24.8	305.1	101.6	5.8	7.0	7.6	275.9	7.26	47.6
254x146x43	43.0	259.6	147.3	7.2	12.7	7.6	219.0	5.80	30.4
254x146x37	37.0	256.0	146.4	6.3	10.9	7.6	219.0	6.72	34.8
254x146x31	31.1	251.4	146.1	6.0	8.6	7.6	219.0	8.49	36.5
254x102x28	28.3	260.4	102.2	6.3	10.0	7.6	225.2	5.11	35.7
254x102x25	25.2	257.2	101.9	6.0	8.4	7.6	225.2	6.07	37.5
254x102x22	22.0	254.0	101.6	5.7	6.8	7.6	225.2	7.47	39.5
203x133x30	30.0	206.8	133.9	6.4	9.6	7.6	172.4	6.97	26.9
203x133x25	25.1	203.2	133.2	5.7	7.8	7.6	172.4	8.54	30.2
203x102x23	23.1	203.2	101.8	5.4	9.3	7.6	169.4	5.47	31.4
178x102x19	19.0	177.8	101.2	4.8	7.9	7.6	146.8	6.41	30.6
152x89x16	16.0	152.4	88.7	4.5	7.7	7.6	121.8	5.76	27.1
127x76x13	13.0	127.0	76.0	4.0	7.6	7.6	96.6	5.00	24.1



UNIVERSAL BEAMS

PROPERTIES

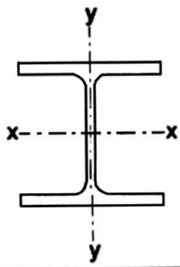
Section Designation	Second Moment Of Area		Radius Of Gyration		Elastic Modulus		Plastic Modulus		Area Of Section
	Axis x-x cm⁴	Axis y-y cm⁴	Axis x-x cm	Axis y-y cm	Axis x-x cm³	Axis y-y cm³	Axis x-x cm³	Axis y-y cm³	A cm²
305x102x33	6501	194	12.5	2.15	416	37.9	481	60.0	41.8
305x102x28	5366	155	12.2	2.08	348	30.5	403	48.5	35.9
305x102x25	4455	123	11.9	1.97	292	24.2	342	38.8	31.6
254x146x43	6544	677	10.9	3.52	504	92.0	566	141	54.8
254x146x37	5537	571	10.8	3.48	433	78.0	483	119	47.2
254x146x31	4413	448	10.5	3.36	351	61.3	393	94.1	39.7
254x102x28	4005	179	10.5	2.22	308	34.9	353	54.8	36.1
254x102x25	3415	149	10.3	2.15	266	29.2	306	46.0	32.0
254x102x22	2841	119	10.1	2.06	224	23.5	259	37.3	28.0
203x133x30	2896	385	8.71	3.17	280	57.5	314	88.2	38.2
203x133x25	2340	308	8.56	3.10	230	46.2	258	70.9	32.0
203x102x23	2105	164	8.46	2.36	207	32.2	234	49.8	29.4
178x102x19	1356	137	7.48	2.37	153	27.0	171	41.6	24.3
152x89x16	834	89.8	6.41	2.10	109	20.2	123	31.2	20.3
127x76x13	473	55.7	5.35	1.84	74.6	14.7	84.2	22.6	16.5



UNIVERSAL COLUMNS

DIMENSIONS

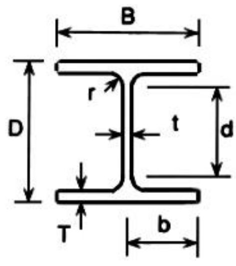
Section Designation	Mass Per Metre	Depth Of Section	Width Of Section	Thickness		Root Radius	Depth Between Fillets	Ratios For Local Buckling	
				Web	Flange			Flange	Web
		D	B	t	T	r	d	b/T	d/t
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
356x406x634	633.9	474.6	424.0	47.6	77.0	15.2	290.2	2.75	6.10
356x406x551	551.0	455.6	418.5	42.1	67.5	15.2	290.2	3.10	6.89
356x406x467	467.0	436.6	412.2	35.8	58.0	15.2	290.2	3.55	8.11
356x406x393	393.0	419.0	407.0	30.6	49.2	15.2	290.2	4.14	9.48
356x406x340	339.9	406.4	403.0	26.6	42.9	15.2	290.2	4.70	10.9
356x406x287	287.1	393.6	399.0	22.6	36.5	15.2	290.2	5.47	12.8
356x406x235	235.1	381.0	394.8	18.4	30.2	15.2	290.2	6.54	15.8
356x368x202	201.9	374.6	374.7	16.5	27.0	15.2	290.2	6.94	17.6
356x368x177	177.0	368.2	372.6	14.4	23.8	15.2	290.2	7.83	20.2
356x368x153	152.9	362.0	370.5	12.3	20.7	15.2	290.2	8.95	23.6
356x368x129	129.0	355.6	368.6	10.4	17.5	15.2	290.2	10.5	27.9
305x305x283	282.9	365.3	322.2	26.8	44.1	15.2	246.7	3.65	9.21
305x305x240	240.0	352.5	318.4	23.0	37.7	15.2	246.7	4.22	10.7
305x305x198	198.1	339.9	314.5	19.1	31.4	15.2	246.7	5.01	12.9
305x305x158	158.1	327.1	311.2	15.8	25.0	15.2	246.7	6.22	15.6
305x305x137	136.9	320.5	309.2	13.8	21.7	15.2	246.7	7.12	17.9
305x305x118	117.9	314.5	307.4	12.0	18.7	15.2	246.7	8.22	20.6
305x305x97	96.9	307.9	305.3	9.9	15.4	15.2	246.7	9.91	24.9
254x254x167	167.1	289.1	265.2	19.2	31.7	12.7	200.3	4.18	10.4
254x254x132	132.0	276.3	261.3	15.3	25.3	12.7	200.3	5.16	13.1
254x254x107	107.1	266.7	258.8	12.8	20.5	12.7	200.3	6.31	15.6
254x254x89	88.9	260.3	256.3	10.3	17.3	12.7	200.3	7.41	19.4
254x254x73	73.1	254.1	254.6	8.6	14.2	12.7	200.3	8.96	23.3
203x203x86	86.1	222.2	209.1	12.7	20.5	10.2	160.8	5.10	12.7
203x203x71	71.0	215.8	206.4	10.0	17.3	10.2	160.8	5.97	16.1
203x203x60	60.0	209.6	205.8	9.4	14.2	10.2	160.8	7.25	17.1
203x203x52	52.0	206.2	204.3	7.9	12.5	10.2	160.8	8.17	20.4
203x203x46	46.1	203.2	203.6	7.2	11.0	10.2	160.8	9.25	22.3
152x152x37	37.0	161.8	154.4	8.0	11.5	7.6	123.6	6.71	15.4
152x152x30	30.0	157.6	152.9	6.5	9.4	7.6	123.6	8.13	19.0
152x152x23	23.0	152.4	152.2	5.8	6.8	7.6	123.6	11.2	21.3



UNIVERSAL COLUMNS

PROPERTIES

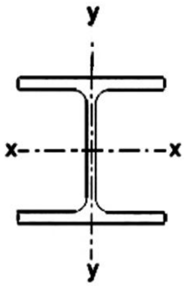
Section Designation	Second Moment Of Area		Radius Of Gyration		Elastic Modulus		Plastic Modulus		Area Of Section
	Axis x-x cm^4	Axis y-y cm^4	Axis x-x cm	Axis y-y cm	Axis x-x cm^3	Axis y-y cm^3	Axis x-x cm^3	Axis y-y cm^3	A cm^2
356x406x634	274800	98130	18.4	11.0	11580	4629	14240	7108	808
356x406x551	226900	82670	18.0	10.9	9962	3951	12080	6058	702
356x406x467	183000	67830	17.5	10.7	8383	3291	10000	5034	595
356x406x393	146600	55370	17.1	10.5	6998	2721	8222	4154	501
356x406x340	122500	46850	16.8	10.4	6031	2325	6999	3544	433
356x406x287	99880	38680	16.5	10.3	5075	1939	5812	2949	366
356x406x235	79080	30990	16.3	10.2	4151	1570	4687	2383	299
356x368x202	66260	23690	16.1	9.60	3538	1264	3972	1920	257
356x368x177	57120	20530	15.9	9.54	3103	1102	3455	1671	226
356x368x153	48590	17550	15.8	9.49	2684	948	2965	1435	195
356x368x129	40250	14610	15.6	9.43	2264	793	2479	1199	164
305x305x283	78870	24630	14.8	8.27	4318	1529	5105	2342	360
305x305x240	64200	20310	14.5	8.15	3643	1276	4247	1951	306
305x305x198	50900	16300	14.2	8.04	2995	1037	3440	1581	252
305x305x158	38750	12570	13.9	7.90	2369	808	2680	1230	201
305x305x137	32810	10700	13.7	7.83	2048	692	2297	1053	174
305x305x118	27670	9059	13.6	7.77	1760	589	1958	895	150
305x305x97	22250	7308	13.4	7.69	1445	479	1592	726	123
254x254x167	30000	9870	11.9	6.81	2075	744	2424	1137	213
254x254x132	22530	7531	11.6	6.69	1631	576	1869	878	168
254x254x107	17510	5928	11.3	6.59	1313	458	1484	697	136
254x254x89	14270	4857	11.2	6.55	1096	379	1224	575	113
254x254x73	11410	3908	11.1	6.48	898	307	992	465	93.1
203x203x86	9449	3127	9.28	5.34	850	299	977	456	110
203x203x71	7618	2537	9.18	5.30	706	246	799	374	90.4
203x203x60	6125	2065	8.96	5.20	584	201	656	305	76.4
203x203x52	5259	1778	8.91	5.18	510	174	567	264	66.3
203x203x46	4568	1548	8.82	5.13	450	152	497	231	58.7
152x152x37	2210	706	6.85	3.87	273	91.5	309	140	47.1
152x152x30	1748	560	6.76	3.83	222	73.3	248	112	38.3
152x152x23	1250	400	6.54	3.70	164	52.6	182	80.2	29.2



UNIVERSAL BEARING PILES

DIMENSIONS

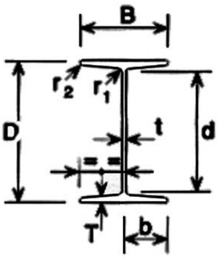
Section Designation	Mass Per Metre kg/m	Depth Of Section D mm	Width Of Section B mm	Thickness Web t mm	Thickness Flange T mm	Root Radius r mm	Depth Between Fillets d mm	Ratios For Local Buckling Flange b/T	Ratios For Local Buckling Web d/t
356x368x174	173.9	361.4	378.5	20.3	20.4	15.2	290.2	9.28	14.3
356x368x152	152.0	356.4	376.0	17.8	17.9	15.2	290.2	10.5	16.3
356x368x133	133.0	352.0	373.8	15.6	15.7	15.2	290.2	11.9	18.6
356x368x109	108.9	346.4	371.0	12.8	12.9	15.2	290.2	14.4	22.7
305x305x223	222.9	337.9	325.7	30.3	30.4	15.2	246.7	5.36	8.14
305x305x186	186.0	328.3	320.9	25.5	25.6	15.2	246.7	6.27	9.67
305x305x149	149.1	318.5	316.0	20.6	20.7	15.2	246.7	7.63	12.0
305x305x126	126.1	312.3	312.9	17.5	17.6	15.2	246.7	8.89	14.1
305x305x110	110.0	307.9	310.7	15.3	15.4	15.2	246.7	10.1	16.1
305x305x95	94.9	303.7	308.7	13.3	13.3	15.2	246.7	11.6	18.5
305x305x88	88.0	301.7	307.8	12.4	12.3	15.2	246.7	12.5	19.9
305x305x79	78.9	299.3	306.4	11.0	11.1	15.2	246.7	13.8	22.4
254x254x85	85.1	254.3	260.4	14.4	14.3	12.7	200.3	9.10	13.9
254x254x71	71.0	249.7	258.0	12.0	12.0	12.7	200.3	10.8	16.7
254x254x63	63.0	247.1	256.6	10.6	10.7	12.7	200.3	12.0	18.9
203x203x54	53.9	204.0	207.7	11.3	11.4	10.2	160.8	9.11	14.2
203x203x45	44.9	200.2	205.9	9.5	9.5	10.2	160.8	10.8	16.9



UNIVERSAL BEARING PILES

PROPERTIES

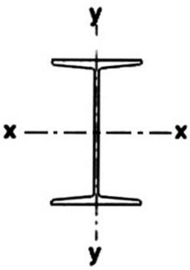
Section Designation	Second Moment Of Area		Radius Of Gyration		Elastic Modulus		Plastic Modulus		Area Of Section
	Axis x-x	Axis y-y	Axis x-x	Axis y-y	Axis x-x	Axis y-y	Axis x-x	Axis y-y	A
	cm^4	cm^4	cm	cm	cm^3	cm^3	cm^3	cm^3	cm^2
356x368x174	51010	18460	15.2	9.13	2823	976	3186	1497	221
356x368x152	43970	15880	15.1	9.05	2468	845	2767	1293	194
356x368x133	37980	13680	15.0	8.99	2158	732	2406	1119	169
356x368x109	30630	10990	14.9	8.90	1769	592	1956	903	139
305x305x223	52700	17580	13.6	7.87	3119	1079	3653	1680	284
305x305x186	42610	14140	13.4	7.73	2596	881	3003	1366	237
305x305x149	33070	10910	13.2	7.58	2076	691	2370	1066	190
305x305x126	27410	9002	13.1	7.49	1755	575	1986	885	161
305x305x110	23560	7709	13.0	7.42	1531	496	1720	762	140
305x305x95	20040	6529	12.9	7.35	1320	423	1474	648	121
305x305x88	18420	5984	12.8	7.31	1221	389	1360	595	112
305x305x79	16440	5326	12.8	7.28	1099	348	1218	531	100
254x254x85	12280	4215	10.6	6.24	966	324	1092	498	108
254x254x71	10070	3439	10.6	6.17	807	267	904	409	90.4
254x254x63	8860	3016	10.5	6.13	717	235	799	360	80.2
203x203x54	5027	1705	8.55	4.98	493	164	557	252	68.7
203x203x45	4100	1384	8.46	4.92	410	134	459	206	57.2



JOISTS

DIMENSIONS

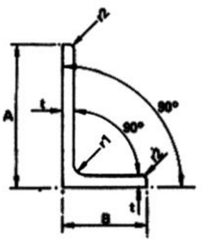
Section Designation	Mass Per Metre	Depth Of Section	Width Of Section	Thickness		Root Radius	Toe Radius	Depth Between Fillets	Ratios For Local Buckling	
				Web	Flange				Flange	Web
		D	B	t	T	r_1	r_2	d	b/T	d/t
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
254x203x82	82.0	254.0	203.2	10.2	19.9	19.6	9.7	166.6	5.11	16.3
254x114x37	37.2	254.0	114.3	7.6	12.8	12.4	6.1	199.3	4.46	26.2
203x152x52	52.3	203.2	152.4	8.9	16.5	15.5	7.6	133.2	4.62	15.0
152x127x37	37.3	152.4	127.0	10.4	13.2	13.5	6.6	94.3	4.81	9.07
127x114x29	29.3	127.0	114.3	10.2	11.5	9.9	4.8	79.5	4.97	7.79
127x114x27	26.9	127.0	114.3	7.4	11.4	9.9	5.0	79.5	5.01	10.7
127x76x16	16.5	127.0	76.2	5.6	9.6	9.4	4.6	86.5	3.97	15.4
114x114x27	27.1	114.3	114.3	9.5	10.7	14.2	3.2	60.8	5.34	6.40
102x102x23	23.0	101.6	101.6	9.5	10.3	11.1	3.2	55.2	4.93	5.81
102x44x7	7.5	101.6	44.5	4.3	6.1	6.9	3.3	74.6	3.65	17.3
89x89x19	19.5	88.9	88.9	9.5	9.9	11.1	3.2	44.2	4.49	4.65
76x76x15	15.0	76.2	80.0	8.9	8.4	9.4	4.6	38.1	4.76	4.28
76x76x13	12.8	76.2	76.2	5.1	8.4	9.4	4.6	38.1	4.54	7.47



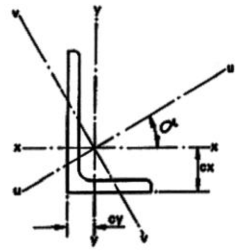
JOISTS

PROPERTIES

Section Designation	Second Moment Of Area		Radius Of Gyration		Elastic Modulus		Plastic Modulus		Area Of Section
	Axis x-x cm^4	Axis y-y cm^4	Axis x-x cm	Axis y-y cm	Axis x-x cm^3	Axis y-y cm^3	Axis x-x cm^3	Axis y-y cm^3	cm^2
254x203x82	12020	2280	10.7	4.67	947	224	1077	371	105
254x114x37	5082	269	10.4	2.39	400	47.1	459	79.1	47.3
203x152x52	4798	816	8.49	3.50	472	107	541	176	66.6
152x127x37	1818	378	6.19	2.82	239	59.6	279	99.8	47.5
127x114x29 •	979	242	5.12	2.54	154	42.3	181	70.8	37.4
127x114x27	946	236	5.26	2.63	149	41.3	172	68.2	34.2
127x76x16	571	60.8	5.21	1.70	90.0	16.0	104	26.4	21.1
114x114x27	736	224	4.62	2.55	129	39.2	151	65.8	34.5
102x102x23	486	154	4.07	2.29	95.6	30.3	113	50.6	29.3
102x44x7	153	7.82	4.01	0.907	30.1	3.51	35.4	6.03	9.50
89x89x19	307	101	3.51	2.02	69.0	22.8	82.7	38.0	24.9
76x76x15	172	60.9	3.00	1.78	45.2	15.2	54.2	25.8	19.1
76x76x13	158	51.8	3.12	1.79	41.5	13.6	48.7	22.4	16.2

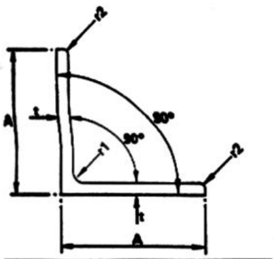


UNEQUAL ANGLES



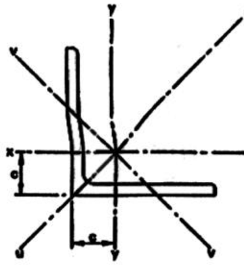
DIMENSIONS AND PROPERTIES

Designation: Size A B mm	Designation: Thickness t mm	Mass Per Metre kg	Radius: Root r1 mm	Radius: Toe r2 mm	Area Of Section cm²	Distance Centre Of Gravity: cx cm	Distance Centre Of Gravity: cy cm	Second Moment Of Area: Axis x-x cm⁴	Second Moment Of Area: Axis y-y cm⁴	Second Moment Of Area: Axis u-u cm⁴	Second Moment Of Area: Axis v-v cm⁴	Radius Of Gyration: Axis x-x cm	Radius Of Gyration: Axis y-y cm	Radius Of Gyration: Axis u-u cm	Radius Of Gyration: Axis v-v cm	Elastic Modulus: Axis x-x cm³	Elastic Modulus: Axis y-y cm³	Angle x-x Axis to u-u Axis Tanα
200x150	18	47.1	15.0	4.8	60.1	6.34	3.86	2390	1155	2922	623	6.30	4.38	6.97	3.22	175	104	0.549
	15	39.6	15.0	4.8	50.6	6.22	3.75	2037	989	2495	531	6.34	4.42	7.02	3.24	148	87.8	0.551
	12	32.0	15.0	4.8	40.9	6.10	3.63	1667	812	2045	435	6.38	4.45	7.07	3.26	120	71.4	0.553
200x100	15	33.7	15.0	4.8	43.1	7.17	2.23	1772	303	1879	197	6.41	2.65	6.60	2.13	138	39.0	0.260
	12	27.3	15.0	4.8	34.9	7.04	2.11	1454	252	1544	162	6.45	2.68	6.65	2.15	112	31.9	0.263
	10	23.0	15.0	4.8	29.4	6.95	2.03	1233	215	1310	138	6.48	2.70	6.68	2.17	94.5	26.9	0.265
150x90	15	26.6	12.0	4.8	34.0	5.21	2.24	764	207	844	127	4.74	2.47	4.99	1.93	78.0	30.6	0.354
	12	21.6	12.0	4.8	27.6	5.09	2.12	630	172	698	104	4.78	2.50	5.03	1.95	63.6	25.0	0.359
	10	18.2	12.0	4.8	23.2	5.00	2.04	536	147	595	89.1	4.81	2.52	5.06	1.96	53.6	21.2	0.361
150x75	15	24.8	11.0	4.8	31.7	5.53	1.81	715	120	756	79.2	4.75	1.95	4.89	1.58	75.5	21.1	0.254
	12	20.2	11.0	4.8	25.7	5.41	1.70	591	100	626	65.2	4.79	1.98	4.93	1.59	61.6	17.3	0.259
	10	17.0	11.0	4.8	21.7	5.32	1.62	503	86.3	534	55.7	4.82	2.00	4.96	1.60	52.0	14.7	0.262
137x102	9.5+	17.3	11.0	4.8	22.0	4.23	2.50	415	198	506	107	4.35	3.00	4.80	2.20	43.8	25.7	0.543
	7.9+	14.5	11.0	4.8	18.4	4.16	2.44	351	168	428	90.4	4.36	3.02	4.82	2.22	36.8	21.6	0.544
	6.4+	11.7	11.0	4.8	15.0	4.09	2.37	289	138	352	74.7	4.38	3.03	4.84	2.23	30.0	17.6	0.544
125x75	12	17.8	11.0	4.8	22.7	4.31	1.84	355	96.0	392	58.8	3.95	2.06	4.16	1.61	43.4	17.0	0.354
	10	15.0	11.0	4.8	19.2	4.23	1.76	303	82.5	336	50.2	3.98	2.08	4.19	1.62	36.7	14.4	0.358
	8	12.2	11.0	4.8	15.5	4.14	1.68	249	68.1	275	41.2	4.00	2.10	4.21	1.63	29.7	11.7	0.360
	6.5+	9.98	11.0	4.8	12.7	4.07	1.62	206	56.6	228	34.3	4.02	2.11	4.23	1.64	24.4	9.62	0.361
100x75	12	15.4	10.0	4.8	19.7	3.27	2.03	189	90.3	230	49.5	3.10	2.14	3.42	1.59	28.1	16.5	0.540
	10	13.0	10.0	4.8	16.6	3.19	1.95	162	77.7	198	42.2	3.12	2.16	3.45	1.59	23.8	14.0	0.544
	8	10.6	10.0	4.8	13.5	3.10	1.87	133	64.2	163	34.7	3.14	2.18	3.48	1.61	19.3	11.4	0.547
100x65	10	12.3	10.0	4.8	15.6	3.36	1.63	154	51.1	175	30.2	3.14	1.81	3.35	1.39	23.2	10.5	0.410
	8	9.94	10.0	4.8	12.7	3.28	1.56	127	42.3	144	24.9	3.17	1.83	3.38	1.40	18.9	8.56	0.414
	7	8.77	10.0	4.8	11.2	3.23	1.51	113	37.7	128	22.1	3.18	1.84	3.39	1.41	16.6	7.56	0.415
80x60	8	8.34	8.0	4.8	10.6	2.55	1.56	65.8	31.5	80.2	17.1	2.49	1.72	2.75	1.27	12.1	7.09	0.544
	7	7.36	8.0	4.8	9.35	2.50	1.52	58.5	28.1	71.4	15.2	2.50	1.73	2.76	1.27	10.6	6.26	0.545
	6	6.37	8.0	4.8	8.08	2.46	1.48	50.9	24.5	62.2	13.2	2.51	1.74	2.77	1.28	9.19	5.41	0.546
75x50	8	7.39	7.0	2.4	9.44	2.53	1.29	52.4	18.6	60.1	10.9	2.36	1.40	2.52	1.07	10.5	5.00	0.430
	6	5.65	7.0	2.4	7.22	2.44	1.21	40.9	14.6	47.1	8.48	2.38	1.42	2.55	1.08	8.10	3.87	0.436
65x50	8	6.75	6.0	2.4	8.61	2.12	1.37	34.9	17.8	43.1	9.62	2.01	1.44	2.24	1.06	7.97	4.92	0.569
	6	5.16	6.0	2.4	6.59	2.04	1.30	27.4	14.1	34.0	7.49	2.04	1.46	2.27	1.07	6.14	3.80	0.575
	5	4.35	6.0	2.4	5.55	2.00	1.26	23.3	12.0	29.0	6.38	2.05	1.47	2.28	1.07	5.18	3.21	0.577
60x30	6	3.99	6.0	2.4	5.09	2.20	0.724	18.3	3.05	19.3	2.01	1.90	0.774	1.95	0.629	4.82	1.34	0.252
	5	3.37	6.0	2.4	4.30	2.16	0.684	15.7	2.64	16.6	1.72	1.91	0.783	1.96	0.632	4.08	1.14	0.256
40x25	4	1.93	4.0	2.4	2.45	1.36	0.621	3.86	1.15	4.32	0.692	1.26	0.685	1.33	0.532	1.46	0.612	0.380

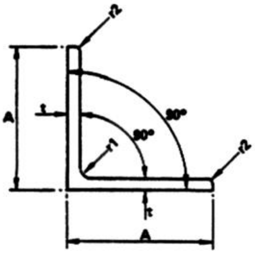


EQUAL ANGLES

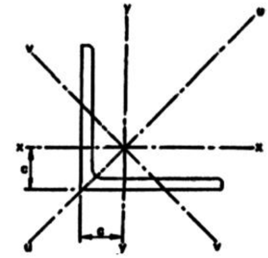
DIMENSIONS AND PROPERTIES



Designation		Mass	Radius		Area	Distance Of	Second Moment Of Area			Radius Of Gyration			Elastic
Size	Thickness	Per Metre	Root	Toe	Of Section	Centre Of Gravity cx and cy	Axis x-x, y-y	Axis u-u	Axis v-v	Axis x-x, y-y	Axis u-u	Axis v-v	Modulus Axis x-x, y-y
A A	t		r1	r2									
mm	mm	kg	mm	mm	cm^2	cm	cm^4	cm^4	cm^4	cm	cm	cm	cm^3
70x70	10	10.3	9.0	2.4	13.1	2.10	58.0	91.6	24.4	2.10	2.64	1.36	11.8
	8	8.36	9.0	2.4	10.7	2.02	48.3	76.5	20.1	2.12	2.67	1.37	9.70
	6	6.38	9.0	2.4	8.19	1.94	37.7	59.8	15.6	2.15	2.70	1.38	7.45
60x60	10	8.69	8.0	2.4	11.1	1.85	35.3	55.6	15.0	1.78	2.24	1.16	8.51
	8	7.09	8.0	2.4	9.07	1.78	29.6	46.7	12.4	1.80	2.27	1.17	7.00
	6	5.42	8.0	2.4	6.95	1.70	23.2	36.8	9.64	1.83	2.30	1.18	5.39
	5	4.57	8.0	2.4	5.86	1.65	19.8	31.4	8.23	1.84	2.31	1.18	4.56
50x50	8	5.82	7.0	2.4	7.44	1.53	16.5	25.9	6.96	1.49	1.87	0.968	4.74
	6	4.47	7.0	2.4	5.72	1.45	13.0	20.6	5.43	1.51	1.90	0.974	3.67
	5	3.77	7.0	2.4	4.83	1.41	11.1	17.7	4.63	1.52	1.91	0.979	3.11
	4	3.06	7.0	2.4	3.92	1.37	9.16	14.5	3.82	1.53	1.92	0.987	2.52
	3	2.33	7.0	2.4	2.99	1.32	7.06	11.1	2.97	1.54	1.93	0.996	1.92
45x45	6	4.00	7.0	2.4	5.12	1.33	9.30	14.7	3.90	1.35	1.69	0.872	2.93
	5	3.38	7.0	2.4	4.33	1.29	7.99	12.6	3.33	1.36	1.71	0.877	2.49
	4	2.74	7.0	2.4	3.52	1.24	6.58	10.4	2.75	1.37	1.72	0.883	2.02
	3	2.09	7.0	2.4	2.69	1.20	5.08	8.03	2.14	1.37	1.73	0.892	1.54
40x40	6	3.52	6.0	2.4	4.49	1.20	6.37	10.1	2.68	1.19	1.50	0.773	2.28
	5	2.97	6.0	2.4	3.80	1.17	5.48	8.68	2.29	1.20	1.51	0.776	1.93
	4	2.42	6.0	2.4	3.09	1.12	4.53	7.18	1.89	1.21	1.52	0.781	1.58
	3	1.84	6.0	2.4	2.36	1.08	3.51	5.55	1.47	1.22	1.53	0.788	1.20
30x30	5	2.18	5.0	2.4	2.78	0.919	2.17	3.42	0.919	0.883	1.11	0.575	1.04
	4	1.78	5.0	2.4	2.27	0.879	1.81	2.86	0.756	0.893	1.12	0.577	0.852
	3	1.36	5.0	2.4	1.74	0.836	1.41	2.23	0.588	0.900	1.13	0.581	0.652
25x25	5	1.77	3.5	2.4	2.25	0.796	1.19	1.87	0.515	0.728	0.912	0.478	0.701
	4	1.45	3.5	2.4	1.84	0.758	1.00	1.58	0.421	0.737	0.926	0.478	0.574
	3	1.11	3.5	2.4	1.41	0.718	0.784	1.24	0.325	0.745	0.939	0.480	0.440

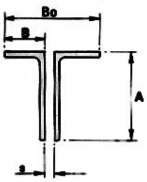


EQUAL ANGLES

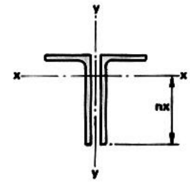


DIMENSIONS AND PROPERTIES

Designation		Mass	Radius		Area	Distance Of	Second Moment Of Area			Radius Of Gyration			Elastic
Size	Thickness	Per Metre	Root	Toe	Of Section	Centre Of Gravity cx and cy	Axis x-x, y-y	Axis u-u	Axis v-v	Axis x-x, y-y	Axis u-u	Axis v-v	Modulus Axis x-x, y-y
A A	t		r1	r2									
mm	mm	kg	mm	mm	cm^2	cm	cm^4	cm^4	cm^4	cm	cm	cm	cm^3
250x250	35	128	20.0	4.8	164	7.51	9305	14720	3886	7.54	9.49	4.88	532
	32	118	20.0	4.8	151	7.40	8650	13710	3592	7.58	9.54	4.89	491
	28	104	20.0	4.8	133	7.25	7741	12290	3194	7.63	9.61	4.90	436
	25	93.6	20.0	4.8	120	7.14	7030	11170	2890	7.67	9.67	4.92	394
200x200	24	71.1	18.0	4.8	90.8	5.85	3356	5322	1391	6.08	7.65	3.91	237
	20	59.9	18.0	4.8	76.6	5.70	2877	4569	1185	6.13	7.72	3.93	201
	18	54.2	18.0	4.8	69.4	5.62	2627	4174	1080	6.15	7.76	3.95	183
	16	48.5	18.0	4.8	62.0	5.54	2369	3765	973	6.18	7.79	3.96	164
150x150	18	40.1	16.0	4.8	51.2	4.38	1060	1680	440	4.55	5.73	2.93	99.8
	15	33.8	16.0	4.8	43.2	4.26	909	1442	375	4.59	5.78	2.95	84.6
	12	27.3	16.0	4.8	35.0	4.14	748	1187	308	4.62	5.82	2.97	68.9
	10	23.0	16.0	4.8	29.5	4.06	635	1008	262	4.64	5.85	2.99	58.0
120x120	15	26.6	13.0	4.8	34.0	3.52	448	710	186	3.63	4.57	2.34	52.8
	12	21.6	13.0	4.8	27.6	3.41	371	589	153	3.66	4.62	2.35	43.1
	10	18.2	13.0	4.8	23.3	3.32	316	502	130	3.69	4.65	2.37	36.4
	8	14.7	13.0	4.8	18.8	3.24	259	411	107	3.71	4.67	2.38	29.5
100x100	15	21.9	12.0	4.8	28.0	3.02	250	395	105	2.99	3.76	1.94	35.8
	12	17.8	12.0	4.8	22.8	2.91	208	330	86.5	3.02	3.81	1.95	29.4
	10+	15.0	12.0	4.8	19.2	2.83	178	283	73.7	3.05	3.84	1.96	24.8
	8	12.2	12.0	4.8	15.6	2.75	146	232	60.5	3.07	3.86	1.97	20.2
90x90	12	15.9	11.0	4.8	20.3	2.66	149	235	62.0	2.70	3.40	1.75	23.5
	10	13.4	11.0	4.8	17.2	2.58	128	202	52.9	2.73	3.43	1.76	19.9
	8	10.9	11.0	4.8	13.9	2.50	105	167	43.4	2.75	3.46	1.77	16.2
	7◆	9.61	11.0	4.8	12.3	2.46	93.2	148	38.6	2.76	3.47	1.77	14.3
	6	8.30	11.0	4.8	10.6	2.41	81.0	128	33.6	2.76	3.48	1.78	12.3
80x80	10	11.9	10.0	4.8	15.1	2.34	87.6	139	36.4	2.41	3.03	1.55	15.5
	8	9.63	10.0	4.8	12.3	2.26	72.4	115	29.9	2.43	3.06	1.56	12.6
	6	7.34	10.0	4.8	9.36	2.17	56.0	88.7	23.2	2.45	3.08	1.57	9.60

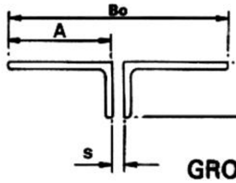


COMPOUND UNEQUAL ANGLES
LONG LEGS BACK TO BACK

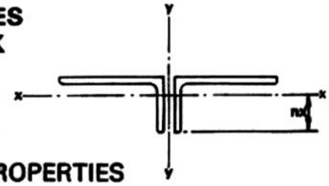


GROSS DIMENSIONS AND SECTION PROPERTIES

Composed Of Two Angles A B mm	t mm	Total Mass Per Metre kg	Distance nx cm	Total Area cm^2	Properties About Axis x-x: Ixx cm^4	rxx cm	Zxx cm^3	Radius Of Gyration ryy About Axis y-y in cm — Back To Back Spacing, s, in mm: 0	8	10	12	15
200x150	18	94.2	13.7	120	4780	6.30	350	5.84	6.11	6.18	6.25	6.36
	15	79.2	13.8	101	4075	6.34	296	5.79	6.06	6.13	6.20	6.30
	12	64.0	13.9	81.9	3335	6.38	240	5.74	6.00	6.07	6.14	6.25
200x100	15	67.4	12.8	86.3	3545	6.41	276	3.46	3.73	3.81	3.88	3.99
	12	54.6	13.0	69.9	2909	6.45	224	3.41	3.67	3.74	3.81	3.92
	10	46.0	13.1	58.8	2466	6.48	189	3.38	3.63	3.70	3.77	3.88
150x90	15	53.2	9.79	67.9	1528	4.74	156	3.33	3.61	3.69	3.76	3.87
	12	43.2	9.91	55.1	1261	4.78	127	3.28	3.55	3.62	3.70	3.81
	10	36.4	10.0	46.4	1073	4.81	107	3.24	3.51	3.58	3.65	3.76
150x75	15	49.6	9.47	63.3	1430	4.75	151	2.66	2.95	3.02	3.10	3.22
	12	40.4	9.59	51.4	1181	4.79	123	2.60	2.88	2.96	3.03	3.15
	10	34.0	9.68	43.3	1006	4.82	104	2.57	2.84	2.91	2.98	3.10
137x102	9.5+	34.6	9.47	43.9	830	4.35	87.6	3.91	4.17	4.24	4.31	4.42
	7.9+	29.0	9.54	36.8	702	4.36	73.6	3.88	4.14	4.21	4.28	4.39
	6.4+	23.4	9.61	30.1	577	4.38	60.1	3.85	4.11	4.17	4.24	4.35
125x75	12	35.6	8.19	45.4	710	3.95	86.8	2.76	3.04	3.12	3.19	3.31
	10	30.0	8.27	38.3	606	3.98	73.3	2.72	3.00	3.07	3.15	3.26
	8	24.4	8.36	31.0	497	4.00	59.5	2.69	2.95	3.03	3.10	3.21
	6.5+	20.0	8.43	25.5	411	4.02	48.8	2.66	2.92	2.99	3.06	3.17
100x75	12	30.8	6.73	39.4	378	3.10	56.2	2.95	3.24	3.32	3.39	3.51
	10	26.0	6.81	33.2	324	3.12	47.6	2.92	3.20	3.27	3.35	3.46
	8	21.2	6.90	27.0	267	3.14	38.7	2.88	3.15	3.23	3.30	3.42
100X65	10	24.6	6.64	31.2	309	3.14	46.5	2.44	2.72	2.80	2.88	2.99
	8	19.9	6.72	25.4	254	3.17	37.8	2.40	2.68	2.75	2.83	2.94
	7	17.5	6.77	22.4	225	3.18	33.3	2.38	2.65	2.73	2.80	2.92
80X60	8	16.7	5.45	21.2	132	2.49	24.1	2.32	2.61	2.69	2.76	2.88
	7	14.7	5.50	18.7	117	2.50	21.3	2.30	2.59	2.66	2.74	2.86
	6	12.7	5.54	16.2	102	2.51	18.4	2.28	2.56	2.63	2.71	2.83
75X50	8	14.8	4.97	18.9	105	2.36	21.1	1.91	2.20	2.27	2.35	2.48
	6	11.3	5.06	14.4	81.9	2.38	16.2	1.87	2.15	2.23	2.31	2.43
65X50	8	13.5	4.38	17.2	69.8	2.01	15.9	1.99	2.28	2.36	2.44	2.57
	6	10.3	4.46	13.2	54.8	2.04	12.3	1.95	2.24	2.32	2.40	2.52
	5	8.70	4.50	11.1	46.7	2.05	10.4	1.94	2.22	2.29	2.37	2.49
60X30	6	7.98	3.80	10.2	36.6	1.90	9.64	1.06	1.37	1.45	1.54	1.67
	5	6.74	3.84	8.61	31.3	1.91	8.16	1.04	1.34	1.42	1.51	1.64

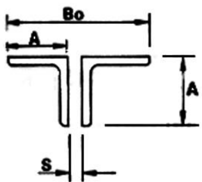


COMPOUND UNEQUAL ANGLES
SHORT LEGS BACK TO BACK

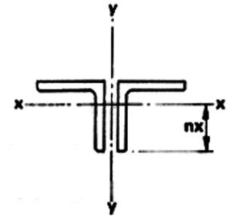


GROSS DIMENSIONS AND SECTION PROPERTIES

Composed Of Two Angles		Total Mass Per Metre	Distance nx	Total Area	Properties About Axis x-x			Radius Of Gyration ryy About Axis y-y in cm				
					Ixx	rxx	Zxx	Back To Back Spacing, s, in mm				
A B mm	t mm	kg	cm	cm^2	cm^4	cm	cm^3	0	8	10	12	15
200x150	18	94.2	11.1	120	2310	4.38	207	8.94	9.23	9.30	9.38	9.49
	15	79.2	11.3	101	1977	4.42	176	8.88	9.17	9.24	9.32	9.43
	12	64.0	11.4	81.9	1625	4.45	143	8.83	9.11	9.18	9.25	9.36
200x100	15	67.4	7.77	86.3	607	2.65	78.0	9.62	9.92	10.0	10.1	10.2
	12	54.6	7.89	69.9	503	2.68	63.8	9.55	9.85	9.92	10.0	10.1
	10	46.0	7.97	58.8	430	2.70	53.9	9.50	9.79	9.87	9.95	10.1
150x90	15	53.2	6.76	67.9	413	2.47	61.1	7.05	7.35	7.42	7.50	7.62
	12	43.2	6.88	55.1	344	2.50	50.1	6.98	7.28	7.35	7.43	7.55
	10	36.4	6.96	46.4	295	2.52	42.4	6.94	7.23	7.31	7.38	7.50
150x75	15	49.6	5.69	63.3	240	1.95	42.2	7.29	7.60	7.68	7.76	7.88
	12	40.4	5.80	51.4	201	1.98	34.6	7.23	7.53	7.61	7.69	7.80
	10	34.0	5.88	43.3	173	2.00	29.3	7.18	7.48	7.56	7.64	7.75
137x102	9.5+	34.6	7.70	43.9	395	3.00	51.3	6.07	6.35	6.42	6.50	6.61
	7.9+	19.0	7.76	36.8	335	3.02	43.2	6.03	6.31	6.39	6.46	6.57
	6.4+	23.4	7.83	30.1	276	3.03	35.3	5.99	6.27	6.35	6.42	6.53
125x75	12	35.6	5.66	45.4	192	2.06	33.9	5.85	6.15	6.23	6.31	6.42
	10	30.0	5.74	38.3	165	2.08	28.8	5.81	6.10	6.18	6.26	6.37
	8	24.4	5.82	31.0	136	2.10	23.4	5.76	6.05	6.13	6.20	6.32
	6.5+	20.0	5.88	25.5	113	2.11	19.2	5.72	6.01	6.08	6.16	6.27
100x75	12	30.8	5.47	39.4	181	2.14	33.0	4.50	4.80	4.88	4.96	5.07
	10	26.0	5.55	33.2	155	2.16	28.0	4.46	4.76	4.83	4.91	5.03
	8	21.2	5.63	27.0	128	2.18	22.8	4.42	4.71	4.78	4.86	4.98
100x65	10	24.6	4.87	31.2	102	1.81	21.0	4.60	4.90	4.98	5.06	5.17
	8	19.9	4.94	25.4	84.7	1.83	17.1	4.56	4.85	4.93	5.00	5.12
	7	17.5	4.99	22.4	75.4	1.84	15.1	4.53	4.82	4.90	4.98	5.09
80x60	8	16.7	4.44	21.2	63.0	1.72	14.2	3.56	3.86	3.93	4.01	4.13
	7	14.7	4.48	18.7	56.1	1.73	12.5	3.54	3.83	3.91	3.99	4.10
	6	12.7	4.52	16.2	49.0	1.74	10.8	3.51	3.81	3.88	3.96	4.08
75x50	8	14.8	3.71	18.9	37.1	1.40	10.0	3.45	3.76	3.83	3.91	4.04
	6	11.3	3.79	14.4	29.3	1.42	7.73	3.41	3.71	3.79	3.87	3.98
65x50	8	13.5	3.63	17.2	35.7	1.44	9.83	2.92	3.22	3.30	3.38	3.50
	6	10.3	3.70	13.2	28.1	1.46	7.60	2.88	3.18	3.26	3.33	3.45
	5	8.70	3.74	11.1	24.1	1.47	6.43	2.86	3.15	3.23	3.31	3.43
60x30	6	7.98	2.28	10.2	6.11	0.774	2.68	2.90	3.22	3.30	3.38	3.51
	5	6.74	2.32	8.61	5.27	0.783	2.28	2.88	3.19	3.27	3.35	3.48

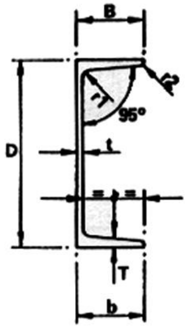


COMPOUND EQUAL ANGLES
LEGS BACK TO BACK



GROSS DIMENSIONS AND SECTION PROPERTIES

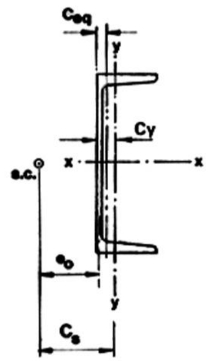
Composed Of Two Angles		Total Mass Per Metre	Distance nx	Total Area	Properties About Axis x-x			Radius Of Gyration ryy About Axis y-y in cm				
					Ixx	rxx	Zxx	Back To Back Spacing, s, in mm				
A A mm	t mm	kg	cm	cm^2	cm^4	cm	cm^3	0	8	10	12	15
250x250	35	256	17.5	327	18610	7.54	1064	10.6	10.9	11.0	11.1	11.2
	32	236	17.6	301	17300	7.58	983	10.6	10.9	10.9	11.0	11.1
	28	208	17.8	266	15480	7.63	872	10.5	10.8	10.9	10.9	11.1
	25	187	17.9	239	14060	7.67	787	10.5	10.8	10.8	10.9	11.0
200x200	24	142	14.1	182	6713	6.08	474	8.44	8.72	8.79	8.86	8.97
	20	120	14.3	153	5754	6.13	402	8.37	8.65	8.72	8.79	8.90
	18	108	14.4	139	5253	6.15	365	8.34	8.61	8.68	8.75	8.86
	16	97.0	14.5	124	4737	6.18	328	8.30	8.57	8.64	8.71	8.82
150x150	18	80.2	10.6	102	2120	4.55	200	6.31	6.60	6.67	6.74	6.86
	15	67.6	10.7	86.4	1817	4.59	169	6.26	6.54	6.61	6.68	6.79
	12	54.6	10.9	70.0	1496	4.62	138	6.21	6.48	6.55	6.62	6.73
	10	46.0	10.9	58.9	1270	4.64	116	6.17	6.44	6.51	6.58	6.68
120x120	15	53.2	8.48	68.0	896	3.63	106	5.06	5.34	5.42	5.49	5.61
	12	43.2	8.59	55.2	742	3.66	86.3	5.00	5.28	5.36	5.43	5.54
	10	36.4	8.68	46.5	632	3.69	72.9	4.96	5.24	5.31	5.38	5.50
	8	29.4	8.76	37.6	517	3.71	59.1	4.92	5.19	5.27	5.34	5.45
100x100	15	43.8	6.98	55.9	500	2.99	71.7	4.25	4.55	4.62	4.70	4.82
	12	35.6	7.09	45.5	416	3.02	58.7	4.20	4.48	4.56	4.63	4.75
	10 +	30.0	7.17	38.4	356	3.05	49.7	4.16	4.44	4.51	4.59	4.70
	8	24.4	7.25	31.1	293	3.07	40.4	4.12	4.39	4.47	4.54	4.65
90x90	12	31.8	6.34	40.6	297	2.70	46.9	3.80	4.09	4.16	4.24	4.35
	10	26.8	6.42	34.3	255	2.73	39.8	3.76	4.04	4.12	4.19	4.31
	8	21.8	6.50	27.8	210	2.75	32.3	3.72	4.00	4.07	4.14	4.26
	7◆	19.2	6.54	24.5	186	2.76	28.5	3.69	3.97	4.04	4.12	4.23
	6	16.6	6.59	21.2	162	2.76	24.6	3.67	3.94	4.02	4.09	4.20
80x80	10	23.8	5.66	30.2	175	2.41	31.0	3.36	3.65	3.72	3.80	3.92
	8	19.3	5.74	24.6	145	2.43	25.2	3.31	3.60	3.67	3.75	3.87
	6	14.7	5.83	18.7	112	2.45	19.2	3.27	3.55	3.62	3.70	3.81
70x70	10	20.6	4.90	26.3	116	2.10	23.7	2.97	3.27	3.34	3.42	3.54
	8	16.7	4.98	21.4	96.6	2.12	19.4	2.93	3.22	3.30	3.38	3.49
	6	12.8	5.06	16.4	75.4	2.15	14.9	2.89	3.18	3.25	3.33	3.44
60x60	10	17.4	4.15	22.2	70.6	1.78	17.0	2.57	2.87	2.95	3.03	3.15
	8	14.2	4.22	18.1	59.1	1.80	14.0	2.53	2.83	2.91	2.98	3.11
	6	10.8	4.30	13.9	46.4	1.83	10.8	2.49	2.78	2.86	2.94	3.06
	5	9.14	4.35	11.7	39.6	1.84	9.11	2.47	2.76	2.83	2.91	3.03



CHANNELS

DIMENSIONS

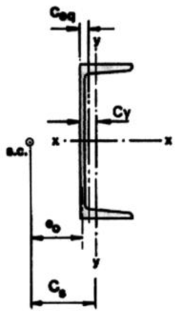
Designation		Depth Of Section	Width Of Section	Thickness		Root Radius	Toe Radius	Depth Between Fillets	Ratios For Local Buckling	
Nominal Size mm	Mass Per Metre kg	D mm	B mm	Web t mm	Flange T mm	r1 mm	r2 mm	d mm	Flange b/T	Web d/t
432x102	65.54	431.8	101.6	12.2	16.8	15.2	4.8	362.5	6.05	29.7
381x102	55.10	381.0	101.6	10.4	16.3	15.2	4.8	312.6	6.23	30.1
305x102	46.18	304.8	101.6	10.2	14.8	15.2	4.8	239.3	6.86	23.5
305x89	41.69	304.8	88.9	10.2	13.7	13.7	3.2	245.4	6.49	24.1
254x89	35.74	254.0	88.9	9.1	13.6	13.7	3.2	194.7	6.54	21.4
254x76	28.29	254.0	76.2	8.1	10.9	12.2	3.2	203.9	6.99	25.2
229x89	32.76	228.6	88.9	8.6	13.3	13.7	3.2	169.9	6.68	19.8
229x76	26.06	228.6	76.2	7.6	11.2	12.2	3.2	177.8	6.80	23.4
203x89	29.78	203.2	88.9	8.1	12.9	13.7	3.2	145.2	6.89	17.9
203x76	23.82	203.2	76.2	7.1	11.2	12.2	3.2	152.4	6.80	21.5
178x89	26.81	177.8	88.9	7.6	12.3	13.7	3.2	121.0	7.23	15.9
178x76	20.84	177.8	76.2	6.6	10.3	12.2	3.2	128.8	7.40	19.5
152x89	23.84	152.4	88.9	7.1	11.6	13.7	3.2	96.9	7.66	13.6
152x76	17.88	152.4	76.2	6.4	9.0	12.2	2.4	105.9	8.47	16.5
127x64	14.90	127.0	63.5	6.4	9.2	10.7	2.4	84.0	6.90	13.1
102x51	10.42◆	101.6	50.8	6.1	7.6	9.1	2.4	65.8	6.68	10.8
76x38	6.70◆	76.2	38.1	5.1	6.8	7.6	2.4	45.8	5.60	8.98



CHANNELS

PROPERTIES

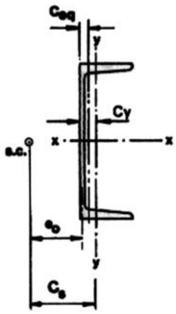
Designation		Second Moment Of Area		Radius Of Gyration		Elastic Modulus		Plastic Modulus		Area of Section
Nominal Size mm	Mass Per Metre kg	Axis x-x cm^4	Axis y-y cm^4	Axis x-x cm	Axis y-y cm	Axis x-x cm^3	Axis y-y cm^3	Axis x-x cm^3	Axis y-y cm^3	A cm^2
432x102	65.54	21370	627	16.0	2.74	990	79.9	1205	153	83.4
381x102	55.10	14870	579	14.6	2.87	781	75.7	931	144	70.1
305x102	46.18	8208	499	11.8	2.91	539	66.5	638	128	58.9
305x89	41.69	7078	326	11.5	2.47	464	48.6	559	92.9	53.3
254x89	35.74	4445	302	9.89	2.58	350	46.7	414	89.6	45.4
254x76	28.29	3355	162	9.67	2.12	264	28.1	316	53.9	35.9
229x89	32.76	3383	285	9.01	2.61	296	44.8	348	86.3	41.6
229x76	26.06	2615	159	8.87	2.19	229	28.3	271	54.5	33.2
203x89	29.78	2492	265	8.11	2.64	245	42.4	287	81.7	37.9
203x76	23.82	1955	152	8.02	2.24	192	27.7	226	53.5	30.4
178x89	26.81	1753	241	7.17	2.66	197	39.3	230	75.4	34.1
178x76	20.84	1338	134	7.10	2.25	151	24.8	176	48.1	26.6
152x89	23.84	1168	216	6.20	2.66	153	35.8	178	68.3	30.4
152x76	17.88	852	114	6.11	2.23	112	21.0	130	41.2	22.8
127x64	14.90	482	67.2	5.04	1.88	76.0	15.2	89.4	29.3	19.0
102x51	10.42	207	29.0	3.95	1.48	40.8	8.14	48.7	15.7	13.3
76x38	6.70	74.3	10.7	2.95	1.12	19.5	4.09	23.5	7.78	8.56



CHANNELS

PLASTIC MODULI-MINOR AXIS

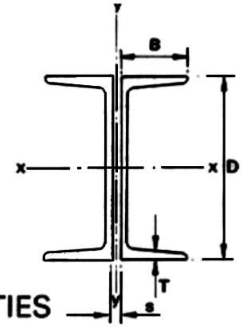
Designation		Dimension	Plastic Modulus	Reduced Value Of Plastic Modulus Under Axial Load About Centroidal Axis												
Nominal Size	Mass Per Metre	Cy	Axis y-y	Axial load and moment inducing stresses of same kind towards back of web						Change Formula At n =	Axial load and moment inducing stresses of opposite kind towards back of web					
				Lower Values Of n			Higher Values Of n				Lower Values Of n			Higher Values Of n		
mm	kg	cm	cm^3	K1	K2	K3	K1	K2	K3		K1	K2	K3	K1	K2	K3
432x102	65.54	2.31	153	153	40.4	2.79	125	453	0.720	0.261	153	40.4	2.79	153	40.4	2.79
381x102	55.10	2.52	144	144	32.3	3.47	139	329	0.580	0.130	144	32.3	3.47	144	32.3	3.47
305x102	46.18	2.65	128	128	28.4	3.51	127	251	0.490	0.0528	128	28.4	3.51	128	28.4	3.51
305x89	41.69	2.18	92.9	92.6	23.1	3.00	87.1	223	0.610	0.166	92.6	23.1	3.00	92.6	23.1	3.00
254x89	35.74	2.42	89.6	89.6	20.4	3.39	89.5	165	0.460	0.0204	89.6	20.4	3.39	89.6	20.4	3.39
254x76	28.29	1.85	53.9	54.1	12.8	3.24	51.7	126	0.590	0.146	54.1	12.8	3.24	54.1	12.8	3.24
229x89	32.76	2.53	86.3	86.4	89.9	0.670	86.2	153	0.440	0.0538	86.4	89.9	0.670	86.6	19.0	3.55
229x76	26.06	2.00	54.5	54.2	12.1	3.50	54.0	105	0.490	0.0494	54.2	12.1	3.50	54.2	12.1	3.50
203x89	29.78	2.65	81.7	81.6	85.2	0.560	80.6	143	0.440	0.129	81.6	85.2	0.560	82.7	17.7	3.67
203x76	23.82	2.14	53.5	53.3	54.4	0.700	53.2	95.1	0.440	0.0474	53.3	54.4	0.700	53.4	11.3	3.72
178x89	26.81	2.76	75.4	75.4	77.1	0.470	73.1	133	0.450	0.207	75.4	77.1	0.470	78.0	16.4	3.74
178x76	20.84	2.20	48.1	48.1	48.7	0.610	47.6	85.9	0.450	0.115	48.1	48.7	0.610	48.6	9.91	3.90
152x89	23.84	2.87	68.3	68.1	67.1	0.400	63.5	123	0.480	0.286	68.1	67.1	0.400	72.4	15.1	3.75
152x76	17.88	2.21	41.2	41.3	40.0	0.600	40.5	74.9	0.460	0.150	41.3	40.0	0.600	42.0	8.51	3.92
127x64	14.90	1.94	29.3	29.3	29.4	0.540	28.8	51.4	0.440	0.150	29.3	29.4	0.540	29.8	7.09	3.20
102x51	10.42	1.51	15.7	15.7	15.2	0.660	15.7	27.2	0.430	0.0671	15.7	15.2	0.660	15.8	4.34	2.63
76x38	6.70	1.19	7.78	7.76	7.60	0.580	7.71	13.2	0.420	0.0927	7.76	7.60	0.580	7.80	2.39	2.26



CHANNELS

PLASTIC MODULI-MINOR AXIS

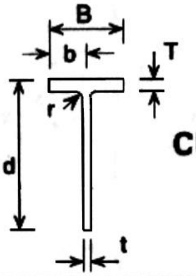
Designation		Dimension	Plastic Modulus	Reduced Value Of Plastic Modulus Under Axial Load About Centroidal Axis												
Nominal Size	Mass Per Metre	Cy	Axis y-y	Axial load and moment inducing stresses of same kind towards back of web						Change Formula At n =	Axial load and moment inducing stresses of opposite kind towards back of web					
				Lower Values Of n			Higher Values Of n				Lower Values Of n			Higher Values Of n		
mm	kg	cm	cm^3	K1	K2	K3	K1	K2	K3		K1	K2	K3	K1	K2	K3
432x102	65.54	2.31	153	153	40.4	2.79	125	453	0.720	0.261	153	40.4	2.79	153	40.4	2.79
381x102	55.10	2.52	144	144	32.3	3.47	139	329	0.580	0.130	144	32.3	3.47	144	32.3	3.47
305x102	46.18	2.65	128	128	28.4	3.51	127	251	0.490	0.0528	128	28.4	3.51	128	28.4	3.51
305x89	41.69	2.18	92.9	92.6	23.1	3.00	87.1	223	0.610	0.166	92.6	23.1	3.00	92.6	23.1	3.00
254x89	35.74	2.42	89.6	89.6	20.4	3.39	89.5	165	0.460	0.0204	89.6	20.4	3.39	89.6	20.4	3.39
254x76	28.29	1.85	53.9	54.1	12.8	3.24	51.7	126	0.590	0.146	54.1	12.8	3.24	54.1	12.8	3.24
229x89	32.76	2.53	86.3	86.4	89.9	0.670	86.2	153	0.440	0.0538	86.4	89.9	0.670	86.6	19.0	3.55
229x76	26.06	2.00	54.5	54.2	12.1	3.50	54.0	105	0.490	0.0494	54.2	12.1	3.50	54.2	12.1	3.50
203x89	29.78	2.65	81.7	81.6	85.2	0.560	80.6	143	0.440	0.129	81.6	85.2	0.560	82.7	17.7	3.67
203x76	23.82	2.14	53.5	53.3	54.4	0.700	53.2	95.1	0.440	0.0474	53.3	54.4	0.700	53.4	11.3	3.72
178x89	26.81	2.76	75.4	75.4	77.1	0.470	73.1	133	0.450	0.207	75.4	77.1	0.470	78.0	16.4	3.74
178x76	20.84	2.20	48.1	48.1	48.7	0.610	47.6	85.9	0.450	0.115	48.1	48.7	0.610	48.6	9.91	3.90
152x89	23.84	2.87	68.3	68.1	67.1	0.400	63.5	123	0.480	0.286	68.1	67.1	0.400	72.4	15.1	3.75
152x76	17.88	2.21	41.2	41.3	40.0	0.600	40.5	74.9	0.460	0.150	41.3	40.0	0.600	42.0	8.51	3.92
127x64	14.90	1.94	29.3	29.3	29.4	0.540	28.8	51.4	0.440	0.150	29.3	29.4	0.540	29.8	7.09	3.20
102x51	10.42	1.51	15.7	15.7	15.2	0.660	15.7	27.2	0.430	0.0671	15.7	15.2	0.660	15.8	4.34	2.63
76x38	6.70	1.19	7.78	7.76	7.60	0.580	7.71	13.2	0.420	0.0927	7.76	7.60	0.580	7.80	2.39	2.26



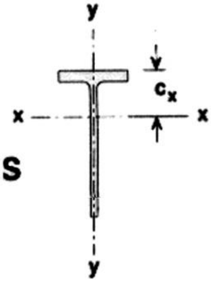
COMPOUND STRUTS
TWO CHANNELS BACK TO BACK

GROSS DIMENSIONS AND SECTION PROPERTIES

Composed Of Two Channels mm	Total Mass Per Metre kg	Total Area cm^2	Properties About Axis x-x				Radius of Gyration ryy About Axis y-y in cm				
			Ixx cm^4	rxx cm	Zxx cm^3	Sxx cm^3	Space between webs in mm				
							0	8	10	12	15
432x102	131	167	42750	16.0	1980	2411	3.59	3.86	3.93	4.00	4.11
381x102	110	140	29740	14.6	1561	1862	3.82	4.09	4.17	4.24	4.35
305x102	92.4	118	16420	11.8	1077	1276	3.94	4.22	4.29	4.37	4.48
305x89	83.4	107	14160	11.5	929	1117	3.30	3.57	3.65	3.72	3.84
254x89	71.5	90.9	8891	9.89	700	828	3.54	3.82	3.90	3.97	4.09
254x76	56.6	71.8	6710	9.67	528	632	2.82	3.10	3.17	3.25	3.36
229x89	65.5	83.3	6766	9.01	592	696	3.64	3.93	4.00	4.08	4.20
229x76	52.1	66.4	5231	8.87	458	542	2.97	3.25	3.32	3.40	3.52
203x89	59.6	75.9	4985	8.11	491	573	3.74	4.03	4.11	4.19	4.30
203x76	47.6	60.8	3910	8.02	385	452	3.09	3.38	3.46	3.54	3.65
178x89	53.6	68.3	3506	7.17	394	459	3.83	4.13	4.20	4.28	4.40
178x76	41.7	53.1	2676	7.10	301	351	3.15	3.44	3.52	3.59	3.71
152x89	47.7	60.8	2337	6.20	307	356	3.91	4.22	4.29	4.37	4.49
152x76	35.8	45.6	1703	6.11	224	260	3.14	3.43	3.51	3.59	3.71
127x64	29.8	38.0	965	5.04	152	179	2.70	3.00	3.08	3.16	3.28
102x51	20.8◆	26.5	415	3.95	81.6	97.3	2.12	2.42	2.50	2.58	2.70
76x38	13.4◆	17.1	149	2.95	39.0	46.9	1.64	1.95	2.03	2.11	2.24

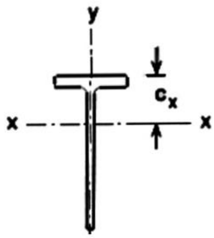


STRUCTURAL TEES
CUT FROM UNIVERSAL BEAMS



DIMENSIONS

Section Designation	Mass Per Metre	Width Of Section	Depth Of Section	Thickness		Root Radius	Ratios for Local Buckling		Dimension
				Web	Flange				
		B	d	t	T	r	d/t	b/T	Cx
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm			cm
178x203x37	37.1	179.5	206.3	9.5	16.0	10.2	21.7	5.61	4.8
178x203x34	33.5	178.8	204.6	8.8	14.3	10.2	23.2	6.25	4.7
178x203x30	30.0	177.9	203.1	7.9	12.8	10.2	25.7	6.95	4.6
178x203x27	27.0	177.7	201.2	7.7	10.9	10.2	26.1	8.15	4.8
140x203x23	23.0	142.2	201.5	6.8	11.2	10.2	29.6	6.35	5.0
140x203x20	19.5	141.8	198.9	6.4	8.6	10.2	31.1	8.24	5.3
171x178x34	33.5	173.2	181.6	9.1	15.7	10.2	20.0	5.52	4.0
171x178x29	28.5	172.2	178.9	8.1	13.0	10.2	22.1	6.62	4.0
171x178x26	25.5	171.5	177.4	7.4	11.5	10.2	24.0	7.46	3.9
171x178x23	22.5	171.1	175.6	7.0	9.7	10.2	25.1	8.82	4.1
127x178x20	19.5	126.0	176.6	6.6	10.7	10.2	26.8	5.89	4.4
127x178x17	16.5	125.4	174.4	6.0	8.5	10.2	29.1	7.38	4.6
165x152x27	27.0	166.9	155.1	7.9	13.7	8.9	19.6	6.09	3.2
165x152x23	23.0	165.7	153.2	6.7	11.8	8.9	22.9	7.02	3.1
165x152x20	20.1	165.0	151.6	6.0	10.2	8.9	25.3	8.09	3.0
127x152x24	24.0	125.3	155.4	9.0	14.0	8.9	17.3	4.48	3.9
127x152x21	20.9	124.3	153.5	8.0	12.1	8.9	19.2	5.14	3.9
127x152x19	18.5	123.4	152.1	7.1	10.7	8.9	21.4	5.77	3.8
102x152x17	16.4	102.4	156.3	6.6	10.8	7.6	23.7	4.74	4.1
102x152x14	14.1	101.8	154.3	6.0	8.8	7.6	25.7	5.78	4.2
102x152x13	12.4	101.6	152.5	5.8	7.0	7.6	26.3	7.26	4.4
146x127x22	21.5	147.3	129.7	7.2	12.7	7.6	18.0	5.80	2.6
146x127x19	18.5	146.4	127.9	6.3	10.9	7.6	20.3	6.72	2.6
146x127x16	15.5	146.1	125.6	6.0	8.6	7.6	20.9	8.49	2.7
102x127x14	14.1	102.2	130.1	6.3	10.0	7.6	20.7	5.11	3.2
102x127x13	12.6	101.9	128.5	6.0	8.4	7.6	21.4	6.07	3.3
102x127x11	11.0	101.6	126.9	5.7	6.8	7.6	22.3	7.47	3.5
133x102x15	15.0	133.9	103.3	6.4	9.6	7.6	16.1	6.97	2.1
133x102x13	12.5	133.2	101.5	5.7	7.8	7.6	17.8	8.54	2.1

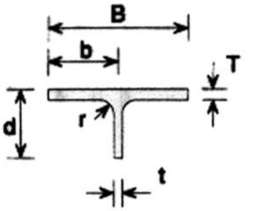


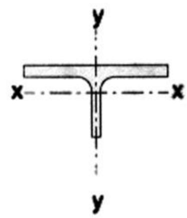
STRUCTURAL TEES CUT FROM UNIVERSAL BEAMS

PROPERTIES

Section Designation	Second Moment Of Area		Radius Of Gyration		Elastic Modulus			Modulus Plastic		Area
	Axis x-x	Axis y-y	Axis x-x	Axis y-y	Axis x-x		Axis y-y	Axis x-x	Axis y-y	
					Flange	Toe				A
	cm^4	cm^4	cm	cm	cm^3	cm^3	cm^3	cm^3	cm^3	cm^2
178x203x37	1736	773	6.06	4.04	365	109	86.1	194	133	47.2
178x203x34	1573	682	6.07	3.99	332	100	76.3	177	118	42.8
178x203x30	1395	602	6.04	3.97	301	89.0	67.6	157	105	38.3
178x203x27	1294	511	6.13	3.85	268	84.6	57.5	150	89.1	34.5
140x203x23	1123	269	6.19	3.03	224	74.2	37.8	132	59.1	29.3
140x203x20	979	205	6.28	2.87	184	67.2	28.9	121	45.4	24.8
171x178x34	1154	681	5.20	3.99	288	81.5	78.6	145	121	42.7
171x178x29	986	554	5.21	3.91	248	70.9	64.4	125	99.4	36.3
171x178x26	882	484	5.21	3.86	224	63.9	56.5	113	87.1	32.4
171x178x23	798	406	5.28	3.76	197	59.1	47.4	104	73.3	28.7
127x178x20	728	179	5.41	2.68	164	55.0	28.4	98.1	44.5	24.9
127x178x17	626	140	5.45	2.58	137	48.6	22.3	87.2	35.1	21.1
165x152x27	642	531	4.32	3.93	200	52.2	63.7	92.8	97.8	34.4
165x152x23	536	448	4.27	3.91	174	43.7	54.1	77.1	82.8	29.4
165x152x20	468	382	4.27	3.86	155	38.6	46.3	67.7	70.9	25.7
127x152x24	662	231	4.65	2.74	168	57.1	36.8	102	58.0	30.6
127x152x21	573	194	4.63	2.70	148	49.9	31.3	88.9	49.2	26.7
127x152x19	501	168	4.61	2.67	132	43.8	27.2	77.9	42.7	23.6
102x152x17	487	97.1	4.82	2.15	118	42.3	19.0	75.8	30.0	20.9
102x152x14	420	77.7	4.84	2.08	100	37.4	15.3	67.5	24.2	17.9
102x152x13	377	61.5	4.88	1.97	85.0	34.8	12.1	63.3	19.4	15.8
146x127x22	343	339	3.54	3.52	130	33.2	46.0	59.5	70.5	27.4
146x127x19	292	285	3.52	3.48	115	28.5	39.0	50.7	59.7	23.6
146x127x16	259	224	3.61	3.36	97.4	26.2	30.6	46.0	47.1	19.8
102x127x14	277	89.3	3.92	2.22	85.5	28.3	17.5	50.4	27.4	18.0
102x127x13	250	74.3	3.95	2.15	75.3	26.2	14.6	46.9	23.0	16.0
102x127x11	223	59.7	3.99	2.06	64.5	24.1	11.7	43.5	18.6	14.0
133x102x15	154	192	2.84	3.17	73.1	18.8	28.7	33.5	44.1	19.1
133x102x13	131	154	2.86	3.10	62.4	16.2	23.1	28.7	35.5	16.0

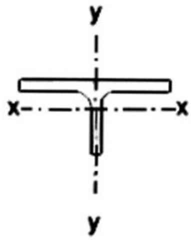
STRUCTURAL TEES
CUT FROM UNIVERSAL COLUMNS





DIMENSIONS

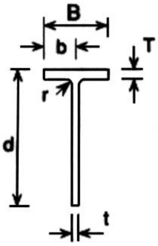
Section Designation	Mass Per Metre kg/m	Width Of Section B mm	Depth Of Section d mm	Thickness: Web t mm	Thickness: Flange T mm	Root Radius r mm	Ratios for Local Buckling: d/t	Ratios for Local Buckling: b/T	Dimension Cx cm
406x178x118	117.5	394.8	190.4	18.4	30.2	15.2	10.3	6.54	3.4
368x178x101	100.9	374.7	187.2	16.5	27.0	15.2	11.3	6.94	3.3
368x178x89	88.5	372.6	184.0	14.4	23.8	15.2	12.8	7.83	3.1
368x178x77	76.4	370.5	180.9	12.3	20.7	15.2	14.7	8.95	2.9
368x178x65	64.5	368.6	177.7	10.4	17.5	15.2	17.1	10.5	2.7
305x152x79	79.0	311.2	163.5	15.8	25.0	15.2	10.3	6.22	3.0
305x152x69	68.4	309.2	160.2	13.8	21.7	15.2	11.6	7.12	2.9
305x152x59	58.9	307.4	157.2	12.0	18.7	15.2	13.1	8.22	2.7
305x152x49	48.4	305.3	153.9	9.9	15.4	15.2	15.5	9.91	2.5
254x127x66	66.0	261.3	138.1	15.3	25.3	12.7	9.03	5.16	2.7
254x127x54	53.5	258.8	133.3	12.8	20.5	12.7	10.4	6.31	2.4
254x127x45	44.4	256.3	130.1	10.3	17.3	12.7	12.6	7.41	2.2
254x127x37	36.5	254.6	127.0	8.6	14.2	12.7	14.8	8.96	2.0
203x102x43	43.0	209.1	111.0	12.7	20.5	10.2	8.74	5.10	2.2
203x102x36	35.5	206.4	107.8	10.0	17.3	10.2	10.8	5.97	2.0
203x102x30	30.0	205.8	104.7	9.4	14.2	10.2	11.1	7.25	1.9
203x102x26	26.0	204.3	103.0	7.9	12.5	10.2	13.0	8.17	1.7
203x102x23	23.0	203.6	101.5	7.2	11.0	10.2	14.1	9.25	1.7
152x76x19	18.5	154.4	80.8	8.0	11.5	7.6	10.1	6.71	1.5
152x76x15	15.0	152.9	78.7	6.5	9.4	7.6	12.1	8.13	1.4
152x76x12	11.5	152.2	76.1	5.8	6.8	7.6	13.1	11.2	1.4



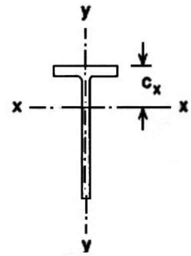
STRUCTURAL TEES CUT FROM UNIVERSAL COLUMNS

PROPERTIES

Section Designation	Second Moment Of Area		Radius Of Gyration		Elastic Modulus			Plastic Modulus		Area
	Axis x-x	Axis y-y	Axis x-x	Axis y-y	Axis x-x		Axis y-y	Axis x-x	Axis y-y	
	cm^4	cm^4	cm	cm	Flange cm^3	Toe cm^3	cm^3	cm^3	cm^3	A cm^2
406x178x118	2863	15500	4.37	10.2	843	183	785	367	1192	150
368x178x101	2463	11840	4.38	9.60	749	160	632	312	960	129
368x178x89	2085	10260	4.30	9.54	676	136	551	263	835	113
368x178x77	1732	8777	4.22	9.49	601	114	474	216	717	97.4
368x178x65	1419	7306	4.16	9.43	527	94.1	396	175	600	82.2
305x152x79	1532	6285	3.90	7.90	503	115	404	225	615	101
305x152x69	1286	5350	3.84	7.83	450	97.7	346	188	526	87.2
305x152x59	1079	4530	3.79	7.77	401	82.8	295	156	448	75.1
305x152x49	858	3654	3.73	7.69	343	66.5	239	123	363	61.7
254x127x66	871	3766	3.22	6.69	323	78.3	288	159	439	84.1
254x127x54	676	2964	3.15	6.59	276	62.1	229	122	349	68.2
254x127x45	524	2429	3.04	6.55	237	48.5	190	94.1	288	56.7
254x127x37	417	1954	2.99	6.48	204	39.2	153	74.1	233	46.5
203x102x43	373	1564	2.61	5.34	169	41.9	150	84.6	228	54.8
203x102x36	280	1269	2.49	5.30	143	31.8	123	63.6	187	45.2
203x102x30	244	1032	2.53	5.20	129	28.4	100	54.4	153	38.2
203x102x26	200	889	2.46	5.18	115	23.4	87.0	44.5	132	33.1
203x102x23	177	774	2.45	5.13	105	20.9	76.0	39.0	115	29.4
152x76x19	93.1	353	1.99	3.87	60.7	14.2	45.7	27.1	69.8	23.5
152x76x15	72.2	280	1.94	3.83	51.4	11.2	36.7	20.9	55.8	19.1
152x76x12	58.5	200	2.00	3.70	41.9	9.41	26.3	16.9	40.1	14.6

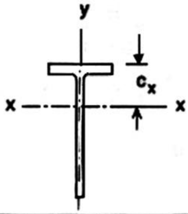


STRUCTURAL TEES CUT FROM UNIVERSAL BEAMS



DIMENSIONS

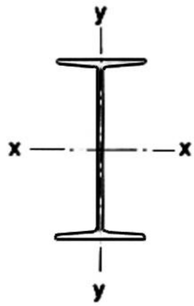
Section Designation	Cut From Universal Beam Section Designation	Mass Per Metre kg/m	Width Of Section B mm	Depth Of Section d mm	Thickness Web t mm	Thickness Flange T mm	Root Radius r mm	Ratios for Local Buckling Web d/t	Ratios for Local Buckling Flange b/T	Dimension Cx cm
305x457x127	914x305x253	126.7	305.5	459.1	17.3	27.9	19.1	26.5	5.47	12.0
305x457x112	914x305x224	112.1	304.1	455.1	15.9	23.9	19.1	28.6	6.36	12.1
305x457x101	914x305x201	100.4	303.3	451.4	15.1	20.2	19.1	29.9	7.51	12.5
292x419x113	838x292x226	113.2	293.8	425.4	16.1	26.8	17.8	26.4	5.48	10.8
292x419x97	838x292x194	96.9	292.4	420.3	14.7	21.7	17.8	28.6	6.74	11.1
292x419x88	838x292x176	87.9	291.7	417.4	14.0	18.8	17.8	29.8	7.76	11.4
267x381x99	762x267x197	98.4	268.0	384.8	15.6	25.4	16.5	24.7	5.28	9.9
267x381x87	762x267x173	86.5	266.7	381.0	14.3	21.6	16.5	26.6	6.17	10.0
267x381x74	762x267x147	73.4	265.2	376.9	12.8	17.5	16.5	29.4	7.58	10.2
267x381x67	762x267x134	66.9	264.4	374.9	12.0	15.5	16.5	31.2	8.53	10.3
254x343x85	686x254x170	85.1	255.8	346.4	14.5	23.7	15.2	23.9	5.40	8.7
254x343x76	686x254x152	76.2	254.5	343.7	13.2	21.0	15.2	26.0	6.06	8.6
254x343x70	686x254x140	70.0	253.7	341.7	12.4	19.0	15.2	27.6	6.68	8.6
254x343x63	686x254x125	62.6	253.0	338.9	11.7	16.2	15.2	29.0	7.81	8.8
305x305x119	610x305x238	119.0	311.4	317.8	18.4	31.4	16.5	17.3	4.96	7.1
305x305x90	610x305x179	89.5	307.1	310.0	14.1	23.6	16.5	22.0	6.51	6.7
305x305x75	610x305x149	74.6	304.8	306.1	11.8	19.7	16.5	25.9	7.74	6.4
229x305x70	610x229x140	69.9	230.2	308.5	13.1	22.1	12.7	23.5	5.21	7.6
229x305x63	610x229x125	62.5	229.0	306.0	11.9	19.6	12.7	25.7	5.84	7.5
229x305x57	610x229x113	56.5	228.2	303.7	11.1	17.3	12.7	27.4	6.60	7.6
229x305x51	610x229x101	50.6	227.6	301.2	10.5	14.8	12.7	28.7	7.69	7.8
210x267x61	533x210x122	61.0	211.9	272.2	12.7	21.3	12.7	21.4	4.97	6.7
210x267x55	533x210x109	54.5	210.8	269.7	11.6	18.8	12.7	23.2	5.61	6.6
210x267x51	533x210x101	50.5	210.0	268.3	10.8	17.4	12.7	24.8	6.03	6.5
210x267x46	533x210x92	46.0	209.3	266.5	10.1	15.6	12.7	26.4	6.71	6.5
210x267x41	533x210x82	41.1	208.8	264.1	9.6	13.2	12.7	27.5	7.91	6.7
191x229x49	457x191x98	49.1	192.8	233.5	11.4	19.6	10.2	20.5	4.92	5.5
191x229x45	457x191x89	44.6	191.9	231.6	10.5	17.7	10.2	22.1	5.42	5.5
191x229x41	457x191x82	41.0	191.3	229.9	9.9	16.0	10.2	23.2	5.98	5.5
191x229x37	457x191x74	37.1	190.4	228.4	9.0	14.5	10.2	25.4	6.57	5.4
191x229x34	457x191x67	33.5	189.9	226.6	8.5	12.7	10.2	26.7	7.48	5.5
152x229x41	457x152x82	41.0	155.3	232.8	10.5	18.9	10.2	22.2	4.11	6.0
152x229x37	457x152x74	37.1	154.4	230.9	9.6	17.0	10.2	24.1	4.54	5.9
152x229x34	457x152x67	33.6	153.8	228.9	9.0	15.0	10.2	25.4	5.13	5.9
152x229x30	457x152x60	29.9	152.9	227.2	8.1	13.3	10.2	28.0	5.75	5.8
152x229x26	457x152x52	26.1	152.4	224.8	7.6	10.9	10.2	29.6	6.99	6.0



STRUCTURAL TEES
CUT FROM UNIVERSAL BEAMS

PROPERTIES

Section Designation	Second Moment Of Area		Radius Of Gyration		Elastic Modulus			Plastic Modulus		Area
	Axis x-x	Axis y-y	Axis x-x	Axis y-y	Axis x-x		Axis y-y	Axis x-x	Axis y-y	
	cm^4	cm^4	cm	cm	Flange cm^3	Toe cm^3	cm^3	cm^3	cm^3	A cm^2
305x457x127	32700	6651	14.2	6.42	2720	965	435	1727	685	161
305x457x112	29060	5618	14.3	6.27	2395	871	369	1566	582	143
305x457x101	26350	4711	14.4	6.07	2106	808	311	1464	491	128
292x419x113	24620	5680	13.1	6.27	2276	776	387	1384	606	144
292x419x97	21340	4533	13.1	6.06	1926	689	310	1237	487	123
292x419x88	19570	3899	13.2	5.90	1723	644	267	1164	421	112
267x381x99	17510	4087	11.8	5.71	1770	613	305	1093	479	125
267x381x87	15480	3425	11.9	5.58	1550	550	257	986	404	110
267x381x74	13240	2728	11.9	5.40	1304	481	206	868	324	93.6
267x381x67	12120	2394	11.9	5.30	1180	445	181	806	285	85.3
254x343x85	12050	3315	10.5	5.53	1389	464	259	826	406	108
254x343x76	10750	2892	10.5	5.46	1249	417	227	743	355	97.0
254x343x70	9910	2592	10.5	5.39	1149	388	204	691	319	89.2
254x343x63	8976	2191	10.6	5.24	1014	358	173	643	271	79.7
305x305x119	12340	7918	9.02	7.23	1737	500	509	893	787	152
305x305x90	9043	5704	8.91	7.07	1353	372	371	656	572	114
305x305x75	7415	4654	8.83	7.00	1150	307	305	538	469	95.0
229x305x70	7741	2253	9.32	5.03	1017	333	196	592	306	89.1
229x305x63	6898	1966	9.31	4.97	915	299	172	531	268	79.7
229x305x57	6265	1717	9.33	4.88	826	275	150	489	235	72.0
229x305x51	5691	1457	9.40	4.76	732	255	128	456	200	64.4
210x267x61	5161	1694	8.15	4.67	775	251	160	446	250	77.7
210x267x55	4604	1471	8.14	4.60	697	226	140	401	218	69.4
210x267x51	4245	1346	8.12	4.57	650	209	128	371	200	64.3
210x267x46	3885	1195	8.14	4.51	593	193	114	343	178	58.7
210x267x41	3527	1004	8.21	4.38	523	179	96.1	320	150	52.3
191x229x49	2967	1174	6.88	4.33	536	167	122	296	189	62.6
191x229x45	2684	1045	6.87	4.29	491	152	109	269	169	56.9
191x229x41	2474	935	6.88	4.23	452	141	97.8	250	152	52.2
191x229x37	2224	836	6.86	4.20	413	127	87.8	225	136	47.3
191x229x34	2034	726	6.90	4.12	372	118	76.5	209	119	42.7
152x229x41	2596	592	7.05	3.37	436	150	76.3	267	120	52.3
152x229x37	2332	523	7.03	3.33	397	135	67.8	242	107	47.2
152x229x34	2121	456	7.04	3.27	359	125	59.3	223	93.3	42.8
152x229x30	1879	397	7.02	3.23	322	111	52.0	199	81.5	38.1
152x229x26	1670	322	7.08	3.11	276	102	42.3	183	66.7	33.3



CASTELLATED JOISTS

PROPERTIES (Continued)

Section Designation		Net Elastic Modulus		Elastic Modulus Of Tee		Net Plastic Modulus		Net Area
Original	Castellated	Axis x-x cm^3	Axis y-y cm^3	Flange x-x cm^3	Toe y-y cm^3	Axis x-x cm^3	Axis y-y cm^3	An cm^2
254x203x82	381x203x82	1506	224	47.6	13.3	1617	367	91.6
254x114x37	381x114x37	625	47.0	30.9	8.19	668	77.3	37.7
203x152x52	305x152x52	752	107	24.4	7.19	810	174	57.5
152x127x37	228x127x37	381	59.5	13.3	4.49	414	97.7	39.6
127x114x29	191x114x29	247	42.2	8.55	2.99	269	69.2	30.9
127x114x27	191x114x27	239	41.2	7.51	2.41	258	67.3	29.5
127x76x16	191x76x16	143	15.9	5.26	1.60	154	25.9	17.5
114x114x27	171x114x27	207	39.1	7.07	2.59	227	64.5	29.0
102x102x23	153x102x23	155	30.2	5.08	1.97	169	49.5	24.5
102x44x7	153x44x7	47.5	3.50	2.21	0.710	51.2	5.79	7.30
89x89x19	134x89x19	112	22.7	3.79	1.57	124	37.0	20.6
76x76x15	114x76x15	73.3	15.2	2.49	1.06	81.0	25.0	15.8
76x76x13	114x76x13	67.5	13.6	2.04	0.789	74.1	22.2	14.3

المراجـع:

– British Standard Code of Practive : CP3 : Chapter V: Part 2 1972.

– BS 5950 : PART 1 : Code of Practice for Design –Rolled and Welded Sections, 1998.

– Design of Structural Steelwork ; by W.M.C. Mckenzie, pub. MACMILLAN Press Ltd, 1998.

– Handbook of Structural Steelwork; Design Examples & ultimate Loads to BS 5950 part 1; by : A.D. Weller & P.H. Allen; Published by: British Constructional Steelwork Association,1991.

– Joints in Simple and Construction; Volume 1+2, Published by: British Constructional Steelwork Association, 1994.

– Lateral Stability of Steel Beams and Columns; by : D.A. Nethercot & R.M. Lawson; Published by: the Steel Construction Institute,1992.

– Plastic Design of Low – Rise Frames ; by M.R. Horne & L.J. Morris ; pub. Collin, 1985.

– Plastic Theory of Structures ; by M.R. Horne , pub. Pergamon Press, 1979.

– Steel Designers'Manual; edited by: G.W. Owens & P.R. Knowles; Published by: Blackwell Science, 2000.

- Steelwork Design ; Guid to BS 5950 : part 1, Volume 1+2; Published by : the Steel Construction Institute, 1997.
- Structural Steelwork Design to BS 5950; by : L.J. Morris &D.R. Plum; Published by : Longman Scientific & Technical, 1990.
- Structural Steelwork ; Design to Limit State Theory ; by TJ Mac Ginley & c Ang ; pub. Butterworth – Heinmann, 1992.
- The Behaviour and Design of Steel Structures to BS 5950, by: N.S. Trahair & M.A. Bradford & D.A. Nethercot; Published by: Spon Press, 2001.

الفهرس

الفصل الخامس : تصميم العناصر المنعطفة

الفصل السادس : الجوائز الصفائحية

الفصل السابع : تصميم العناصر المضغوطة الخاصة

الفصل الثامن : العناصر المعرضة للضغط والانعطاف

الفصل التاسع : الجائز الحامل للرافعة

الفصل العاشر : تصميــم الوصــلات

الفصل الرابع عشر : تصميم الجوائز الشبكية

الفصل الخامس عشر : جمل التربيط

الفصل السادس عشر : قواعد الأعمدة

الفصل السابع عشر: تصميم الإطار البابي 17-1